

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky  
a komunikačních technologií

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY  
A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ**

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

**ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ**

DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

**ANALÝZA SPEKTRA KLARINETŮ OD RŮZNÝCH  
VÝROBCŮ**

THE ANALYSIS OF THE CLARINET SPECTRUM FROM DIFFERENT MANUFACTURERS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Tomáš Suchánek**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.**

**BRNO 2019**

# Bakalářská práce

bakalářský studijní obor **Audio inženýrství**

Ústav telekomunikací

**Student:** Tomáš Suchánek

**ID:** 171070

**Ročník:** 3

**Akademický rok:** 2018/19

**NÁZEV TÉMATU:**

## **Analýza spektra klarinetů od různých výrobců**

### **POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:**

Student změří a vyhodnotí vybrané tóny hrané na různé klarinety stejnými hráči. Vyhodnotí i barvu generovanou v různé dynamice. Porovná spektra – zastoupení harmonických složek a jejich intenzitu i složek neharmonických. Identifikuje a porovná formantové oblasti. Rovněž porovná směrové vyzařování nástrojů. Výstupem budou komparační tabulky spekter, zvláště porovnání 1. až 7 harmonické složky v prvním pásmu, porovnání intenzit lichých a sudých složek, srovnání center a rozpětí formantových oblastí. Navrhne i způsob srovnávání směrovosti. Dá získaná data do souvislosti se značkami klarinetů i s rozměry a tloušťkou plátků i do souvislosti s psycho akustickými veličinami při vnímání barvy.

### **DOPORUČENÁ LITERATURA:**

[1] GEIST, B. Akustika - jevy a souvislosti v hudební teorii a praxi. Praha: MUZIKUS s.r.o., 2005. ISBN 978-8086253312. [2] SYROVÝ, V. Hudební akustika. Praha: AMU, 2003. ISBN 978-80-7331-127-8.

**Termín zadání:** 1.2.2019

**Termín odevzdání:** 27.5.2019

**Vedoucí práce:** MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.

**Konzultant:**

**prof. Ing. Jiří Mišurec, CSc.**  
*předseda oborové rady*

### **UPOZORNĚNÍ:**

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

## ABSTRAKT

Bakalářská práce se věnuje spektrální analýze šesti modelů B klarinetu značek Buffet Crampon, RZ Woodwind Manufacturing a Yamaha. Nástroje byly testovány dvěma profesionálními hráči s rozdílným zvukovým ideálem a výsledné spektrální struktury jsou uvedeny do souvislosti s psychoakustickými veličinami při vnímání zvukové barvy. V kontextu podoby spektra je dále diskutován vliv herní dynamiky, či použití odlišných typů plátku. Součástí analýzy jsou nakonec také směrové charakteristiky vztažené k jednotlivým harmonickým složkám a určení charakteristických formantových oblastí.

## KLÍČOVÁ SLOVA

FFT, Formanty, Hubička, Klarinet, LPC, Plátek, Psychoakustika, Směrové charakteristiky, Spektrální analýza, STFT

## ABSTRACT

Bachelor's thesis focuses on spectral analysis of six B clarinets made by manufacturers Buffet Crampon, RZ Woodwing Manufacturing and Yamaha. Instruments were tested by two professional musicians with different timbral preferences and the resulting spectrum is then applied to how psychoacoustic measurements define timbre perception. Furthermore, the impact of different dynamics or reeds is discussed and significant part of analysis also describes directivity patterns of individual higher harmonics or characteristic formant areas.

## KEYWORDS

FFT, Formants, Mouthpiece, Clarinet, LPC, Reed, Psychoacoustics, Directivity pattern, Spectral analysis, STFT

SUCHÁNEK, Tomáš. *Analýza spektra klarinetů od různých výrobců*. Brno, Rok, 76 s. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací. Vedoucí práce: MgA. Mgr. Ondřej Jirásek, Ph.D.



## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma „Analýza spektra klarinetů od různých výrobců“ jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno .....

.....

podpis autora

## PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu mé bakalářské práce panu Mgr. MgA. Ondřeji Jiráskovi Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné rady ke zpracování projektu. Také bych rád poděkoval Mgr. Liboru Novotnému za zprostředkování nástrojů a poznatky co se týče jednotlivých modelů, nebo nástroje jako takového.

Brno .....

.....

podpis autora

# Obsah

Úvod	10
<b>1 Konstrukce klarinetu a jeho akustické vlastnosti</b>	<b>11</b>
1.1 Historický vývoj	11
1.2 Konstrukční prvky	12
1.2.1 Hubička	12
1.2.2 Plátek	14
1.2.3 Ligatura	15
1.2.4 Střední část a korpus	16
1.3 Princip tvorby tónu	17
1.3.1 Vliv herní dynamiky na spektrum	19
1.3.2 Klarinetové rejstříky	20
<b>2 Zvuková barva</b>	<b>21</b>
2.1 Subjektivní hodnocení barvy zvuku	21
2.2 Objektivní hodnocení barvy zvuku	23
<b>3 Metody spektrální analýzy</b>	<b>24</b>
3.1 Diskrétní Fourierova transformace	24
3.1.1 Váhovací okna	26
3.1.2 Spektrální centroid	27
3.1.3 Spektrální roll-off	27
3.2 Krátkodobá Fourierova transformace	28
3.3 Lineární prediktivní kódování	29
<b>4 Implementace metod v prostředí MATLAB</b>	<b>30</b>
4.1 Funkce k popisu spektra	30
4.1.1 Psychoakustické veličiny	31
4.2 Analýza formantových oblastí	33
4.3 Výpočet směrových charakteristik	33
<b>5 Realizace měření</b>	<b>35</b>
5.1 Metoda snímání	35
5.1.1 Mikrofonní pole	35
5.1.2 Prvky měřicího řetězce	36
5.2 Měření nástroje	36
5.3 Naměřené vzorky	38

<b>6</b>	<b>Vyhodnocení měření</b>	<b>39</b>
6.1	Výběr vzorků a způsob vyhodnocování . . . . .	39
6.2	Tón d . . . . .	41
6.3	Tón c1 . . . . .	46
6.4	Tón g1 . . . . .	51
6.5	Tón c2 . . . . .	56
6.6	Tón g2 . . . . .	61
6.7	Tón d3 . . . . .	64
6.8	Rekapitulace výsledků a diskuze . . . . .	67
<b>7</b>	<b>Závěr</b>	<b>71</b>
	<b>Literatura</b>	<b>72</b>
	<b>Seznam symbolů, veličin a zkratk</b>	<b>74</b>
	<b>Seznam příloh</b>	<b>75</b>
<b>A</b>	<b>Obsah přiloženého CD</b>	<b>76</b>

# Seznam obrázků

1.1	Popis hubičky . . . . .	13
1.2	Popis plátku . . . . .	14
1.3	Popis ligatury . . . . .	15
1.4	Stojaté vlnění v polouzavřené trubici . . . . .	17
1.5	Vliv otevřeného tónového otvoru na rozložení rezonančních módů . . .	18
1.6	Vliv dynamiky hry na proudění vzduchu do nástroje . . . . .	19
3.1	Modulová kmitočtová charakteristika klarinetového tónu . . . . .	25
3.2	Použití váhovacích oken . . . . .	26
3.3	Grafické zobrazení spektrálního centroidu . . . . .	27
3.4	Vliv délky okna na rozlišení spektrogramu . . . . .	28
3.5	Porovnání FFT a LPC s různě volenými predikčními řády . . . . .	29
5.1	Rozmístění mikrofónů při měření . . . . .	35
5.2	Notový zápis měřených tónů pro B klarinet . . . . .	38
6.1	Spektrogramy stejného tónu různé délky . . . . .	39
6.2	LPC analýza tónu d . . . . .	43
6.3	Směrové charakteristiky tónu d . . . . .	45
6.4	LPC analýza tónu c1 . . . . .	48
6.5	Směrové charakteristiky tónu c1 . . . . .	49
6.6	LPC analýza tónu g1 . . . . .	53
6.7	Směrové charakteristiky tónu g1 . . . . .	54
6.8	LPC analýza tónu c2 . . . . .	58
6.9	Směrové charakteristiky tónu c2 . . . . .	59
6.10	Směrové charakteristiky tónu g2 . . . . .	63
6.11	Směrové charakteristiky tónu d3 . . . . .	66
6.12	Inharmonicita tónu g1 . . . . .	67

# Seznam tabulek

6.1	Komparační tabulka spekter tónu d . . . . .	41
6.2	Komparační tabulka spekter tónu c1 . . . . .	46
6.3	Komparační tabulka spekter tónu g1 . . . . .	51
6.4	Komparační tabulka spekter tónu c2 . . . . .	56
6.5	Komparační tabulka spekter tónu g2 . . . . .	61
6.6	Komparační tabulka spekter tónu d3 . . . . .	64
6.7	Příklad tabulky průměrovaných spekter tónu d . . . . .	70

# Úvod

Průzkum zvukových aspektů různých modelů téhož nástroje je nezbytnou součástí aktivní dráhy každého hudebníka. Podobně jako v ostatních směrech je barva klarinetového tónu dána souhrou několika prvků celého akustického řetězce a především vyspělostí herní techniky. Právě na souvislosti vnímané barvy a jí odpovídající spektrální struktury je v této práci kladen nejvyšší důraz. Pro demonstraci výsledků bylo vybráno šest klarinetů z širokého cenového rozpětí, přičemž je diskutován například vliv odlišných plátků, dynamiky a dvou hráčů s rozdílným herním pozadím. Pro doplnění celkového náhledu na jednotlivé měřené modely jsou součástí práce také analýzy směrových charakteristik, nebo typických formantových oblastí.

První polovina bakalářské práce je věnována teoretickému podkladu, kdy je v první kapitole popsán nástroj z hlediska konstrukce a principu tvorby tónu. Druhá kapitola přibližuje tematiku subjektivního a objektivního hodnocení zvukové barvy, která je poté dávána do souvislostí se strukturou spektra, jejíž výpočet je popsán v kapitole třetí.

Druhá polovina práce je pak přímým popisem a vyhodnocením praktické části zadání. Čtvrtá kapitola tedy demonstruje postup při programování algoritmů pro výpočet psychoakustických veličin a spektrálních charakteristik v prostředí MATLAB. Pátá kapitola vykresluje postup při realizaci měření nástrojů v bezodrazové komoře, popisuje měřené nástroje a odůvodňuje výběr měřených tónů. Poslední kapitola je poté věnována vyhodnocení a diskuzi získaných dat. Výsledky jsou seřazeny dle výšky měřených tónů, přičemž součástí každé z těchto podkapitol je důkladná analýza spočtených veličin, které jsou následně shrnuty v závěru celé práce.

# 1 Konstrukce klarinetu a jeho akustické vlastnosti

## 1.1 Historický vývoj

Klarinet je zástupcem dřevěných dechových jednoplátkových nástrojů, jehož počátky sahají do doby 5 až 8 tisíc let před našim letopočtem do oblasti Egypta. První dokonalejší nástroje jsou pak datovány do období Římanů či Řeků, kdy se jednalo zejména o píšťalu nazývanou *aulos*. Nejčastěji byla zhotovena jako dvouplátkový nástroj ze třtiny, lotosu, zimostrázu, slonoviny či kosti. Některé výrobky s větším počtem dírek umožňovaly hru v různých tóninách, nepotřebné dírký se ucpávaly. Na dírký bylo také možné připevnit nástavce v podobě trubiček, které prodlužovaly vzduchový sloupec a snížily tak ladění celé píšťaly. Podobnost těchto nástrojů s klarinetem tkvěla především ve schopnosti přefukování do lichých alikvótních tónů, tedy do duodecimy.

Kromě starověkého Řecka a Říma byly jednoplátkové či dvouplátkové nástroje v Evropě využívány až ve středověku, kde lze najít předchůdce klarinetu v nástroji *chalumeau*. Měl k dispozici 7 otvorů ke krytí prsty, jeho hubička byla neoddelitelnou součástí těla nástroje a dráha pro plátek byla obrácena směrem nahoru, plátek se tedy při hře dotýkal horního rtu hráče. O další rozvoj se poté v 18. století obzvláště zasloužili Johann Christoph Denner a jeho syn Jacob. Ačkoli jejich nástroje měly zprvu přibližně poloviční délku oproti dnešním, inovací bylo zavedení prvních dvou klapek, později přesné vyměření otvoru pro přefukovací klapku a podstatné rozšíření rozsahu nástroje. S postupem času byly přidávány další klapky umožňující komplikovanější herní postupy, délka nástroje již byla srovnatelná s tou dnešní a pro nástroj se ustálil název klarinet, z důvodu podobnosti zvuku s barokní trubkou klarinou, jejíž zvuk místy připomínal.

Mezi zásadní milníky klarinetového vývoje dále patří nástrojová reforma Iwana Müllera. Zprvu plánoval přestavbu klarinetové mechaniky a experimentoval s podlepkami klapek pro jejich lepší těsnění. Jeho podlepy byly potaženy kůží nebo střívkem a uvnitř vycpány vlnou, aby byly více poddajné a pružné oproti dosavadnímu řešení koženými proužky či plstí, které mělo již nevyhovující tónové vlastnosti. Později se však zabýval i samou konstrukcí a počátkem 19. století položil základ tzv. *německému systému klarinetu*. Na základě výpočtů zdokonalil umístění přefukovací klapky, zjistil vzájemný poměr jednotlivých tónů na nástroji vzhledem k temperovanému ladění, definitivně obrátil hubičku plátkem dolů, vázání plátku motouzem nahradil kovovým strojkem se dvěma šroubky a dovršil plnou chromtizaci nástroje přidáním dalších klapek, jejichž počet stoupl na 13. Na takto vyhotovený nástroj



bylo možné zahrát chromatickou stupnici v rozsahu  $e - g_3$ . Zároveň standardizoval B klarinet jako nejběžněji používaný typ.

Jedny z posledních zásadních úprav, ze kterých vychází dnešní modely, přináší francouzští nástrojaři Hyacinthe Eléonore Klosé a August Buffet. Jejich motivací byla nespokojenost s mechanikou Müllerova klarinetu, která způsobovala komplikace při hře ve vyšších tóninách. V polovině 19. století tak přicházejí s klarinetem se sedmácti klapkami a šesti pohyblivými prstenci, resp. brýlemi, umožňující komplexnější kontrolu tónových otvorů. K dalším zdokonalením patří úprava vrtání nástroje, rozšíření dírek a zkvalitnění tónu úpravou hubičky. Klosého-Buffetův hmatový systém je dnes nazýván jako *francouzský systém klarinetu*, který zdokonalil hru na klarinet ve všech rejstřících, zajistil intonační stabilitu a usnadnil hru i ve vzdálenějších tóninách. Následně se rozšířil do celé Evropy. [1]

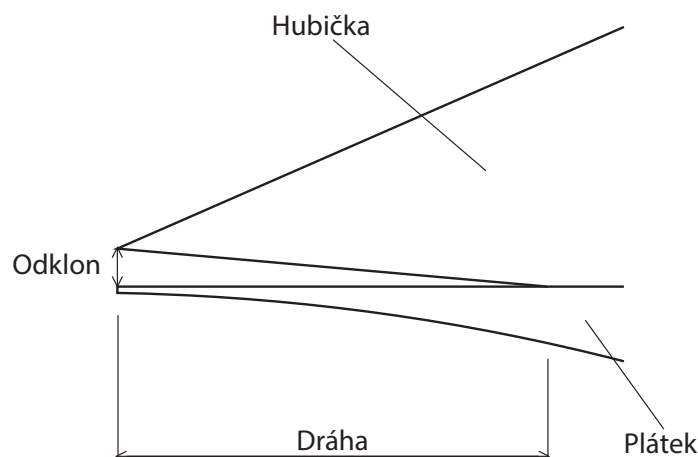
## 1.2 Konstrukční prvky

Moderní klarinet se skládá z šesti odnímatelných částí. Jsou jimi hubička, plátek, ligatura, soudek k úpravě ladění, střední část a korpus. Střední část se rozlišuje dále na část horní a spodní. Každá z těchto částí procházela v průběhu let značným tvarovým či materiálovým vývojem a hráči mají dnes k dispozici širokou paletu zvukových barev, na jejichž charakteristice se všechny jmenované konstrukční prvky menší či větší mírou podílejí. Pro hráče je znalost těchto vlivů nezbytná především v důsledku rozmanitosti požadavků na barvu tónu od hudebních skladatelů, či v kontextu akustických vlastností prostoru, ve kterém vystupují.

### 1.2.1 Hubička

Hubička je nejsvrchnější částí klarinetu, ke které je ligaturou připevněn plátek. Bývá vyrobena zpravidla z ebonitu, extrémně tvrdé hmoty získávané z kaučuku. Při výrobním procesu je kladen velký důraz na přesnost, neboť vzájemnou interakci s plátkem ovlivňují hodnoty v řádu setin milimetrů. Důležitými faktory, které ovlivňují kvalitu tónu, jsou zde odklon a dráha (viz. Obr. 1.1).

Pod označením odklon se rozumí vzdálenost plátku od horního okraje hubičky a značí se v jednotkách  $1/100$  mm. Protože k rozechvění plátku při větším odklonu je zapotřebí vyvinutí většího úsilí než při odklonu menším, je tento parametr většinou svázán s volbou tvrdosti plátku. Doporučení výrobců a dodavatelů hubiček pak obvykle vycházejí ze vztahu *čím větší odklon, tím měkčí plátek* a naopak. Kombinace těchto parametrů má již jisté dopady na výsledný charakter tónu. Souvislosti lze obecně popsat s pomocí následujících dvojic [2]:



Obr. 1.1: Popis hubičky. Překresleno z [2].

- *Odklon v rozmezí hodnot 100-114, tvrdší plátek* - Temnější zabarvení tónu, zřetelné především v dvoučárkované oktávě. Barvu je možné více ovlivnit nátlakem. Časté při interpretaci romantických děl sólově, či v komorním obsazení nebo orchestru.
- *Odklon v rozmezí hodnot 114-127, středně tvrdý-tvrdší plátek* - Kombinace často upřednostňována vyspělejšími hráči, tón je sametový, zřetelný, kulatý a barevný.
- *Odklon s hodnotou nad 127, měkčí plátek* - Časté při interpretaci jazzové hudby. Zvuk je jasný, ostrý až řezavý.

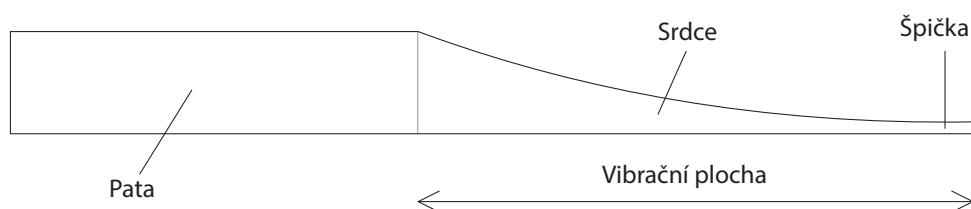
Výběr hubičky se nicméně nevztahuje pouze k odklonu, neméně důležitá je i délka dráhy. Její hodnota je uváděna v milimetrech jako vzdálenost od špičky hubičky k tzv. mrtvému bodu, který označuje poslední místo, kde se plocha plátku setkává s plochou hubičky. Souvislost s kombinací určité tvrdosti plátku je zde poněkud odlišná než u předchozích příkladů. Platí, že při kombinaci krátké dráhy s tvrdým plátkem je rozkmitání plátku obtížnější než při použití stejné dráhy a měkčího plátku. S narůstající délkou dráhy se tedy často volí postupně tvrdší typy plátků, přičemž nejrozšířenější jsou hubičky s přibližně střední až středně delší dráhou, v rozmezí 20,5 - 22,5 mm. Jejich tón bývá měkčí a je možné jej snadněji korigovat dle potřeb interpreta případnou výměnou plátků. V kontextu kratších drah lze hovořit o velmi zvukné barvě tónu, nicméně je zhoršena intonační ovlivnitelnost ve vyšších polohách. [2]

### 1.2.2 Plátek

Plátek klarinetu plní funkci řídicího oscilátoru. Po upevnění k hubičce zůstává mezi jejich špičkami malý otvor, jímž se do nástroje vhání vzduch. Vlivem tlaku vzduchu z ústní dutiny se plátek přiblíží k hubičce a otvor se zmenší, nebo uzavře. Díky své pružnosti a rozdílným poměrům tlaku se poté vychýlí na opačnou stranu a cyklus se opakuje, přirozeně v setinách až tisícinách sekundy. Vzduchové nárazy rozvibrují vzduchový sloupec uvnitř nástroje, čímž vzniká tón, jehož výška je závislá na délce vzduchového sloupce. [5]

Ačkoli je tento princip zjednodušený a detailněji popsán v kap. 1.3, je vhodné tento fakt uvést v souvislosti s materiálovými vlastnostmi plátků. Ty jsou zhotoveny nejčastěji z třtiny obecné. Na její kvalitu jsou kladeny vysoké požadavky, které nelze splnit ve všech klimatických podmínkách, z toho důvodu se k výrobě používá zvláště třtina z oblastí středomoří, především z jižního pobřeží Francie. Klíčová je zde vnitřní a vnější čistota, resp. kvalita použité suroviny, zejména pak její pružnost, neboť výsledný produkt musí být schopný chvění o vysokých kmitočtech.

Další vlastnosti jsou dány postupným výrobním procesem, který trvá po sklizni stvolů i více než dva roky, což je dáno hlavně dlouhou dobou sušení. Následuje seřezání do stanovených tvarů, tedy vytvoření vibrační plochy, seseknutí a zaoblení špičky a konečné broušení. Důležitým faktorem je pak identická hustota dřeva napříč celou plochou výrobku, jejíž nepravidelnosti mohou negativně ovlivnit kmitání.



Obr. 1.2: Popis plátku. Překresleno z [2].

Tónové specifikace byly již nastíněny v předchozí kapitole. Tvrdosti plátků se u výrobců pohybují v rozmezí hodnot 1-5. Měkčí modely mají obecně jasnější tón a jsou více průrazné i ve vyšších rejstřících. Plátky tvrdší naproti tomu vynikají při hře v nižších rejstřících, kde mají plný a pestrobarevný tón. Volba tvrdosti se přizpůsobuje i akustickým podmínkám, ve kterém je skladba interpretována. Například v tlumenějším prostředí inklinují hráči k měkčím typům právě kvůli jejich průraznosti, zatímco v odrazivějším prostředí tento fakt nemusí platit. [2]

Novodobou alternativou mohou být dodatečně plátky vyrobeny z polypropylenů. Dnešní technologie umožňují srovnatelnou kvalitu tónu s plátky z třtiny, přičemž umělé plátky mají několikanásobně delší výdrž a nereagují na teplotní či vlhkostní výkyvy. Navíc v jejich případě odpadá potřeba vlhčení a neabsorbují vodu. [3]

### 1.2.3 Ligatura

Ligatura nebo také strojek je označení pro prstenec vyrobený z kovu či kůže, který slouží k upevnění paty plátku k hubičce. Ve většině prostředí již nahradil zastaralé upevnění šňůrou, které z technických a praktických důvodů v mnohém zaostávalo; celý proces zajištění trval příliš dlouho, přilnutí celé paty plátku k hubičce nebylo vždy dokonale zabezpečeno a zároveň tak vznikalo riziko nevyžádaných pohybů plátku. Zejména tyto problematické faktory jsou ligaturou ošetřeny.

Nejjednodušším, dnes ale také zastaralým provedením, je upevnění plátku vnitřní plochou strojku utažením dvou nad sebou polohovaných šroubků. Řešení to není stále optimální, protože přítlak nemusí být v obou rovinách totožný. Při nadměrném utažení šroubků také hrozí deformace struktury plátku jeho přílišným stlačením. Z toho důvodu jsou modernější ligatury zhotoveny nejčastěji s jedním šroubkem a různými mechanismy přítlaku. Jejich detailnější popis lze najít ve zdrojích [2], [3] nebo [4]. Některé z často používaných typů pak lze popsat takto:

1. Model je zhotoven s kovovým plíškem pokrytým gumovými pásky, které rovnoměrně přitlačují patu plátku v celé šířce na několika místech. Vibrace plátku jsou více tlumené. Napomáhá tmavé a hutné barvě zvuku.
2. Model využívá dvou až tří tenkých měděných či mosazných plíšků, které přitlačují k hubičce spíše střed paty plátku. Mezi nimi je navíc umístěna šňůrka, která vibrace mírně pohlcuje. Krajiní části paty jsou netlumené. Barva tónu inklinuje k přívlastkům jako sametová, kulatá a čistá (viz. Obr. 1.3).



Obr. 1.3: Popis ligatury. Převzato z [2].

### 1.2.4 Střední část a korpus

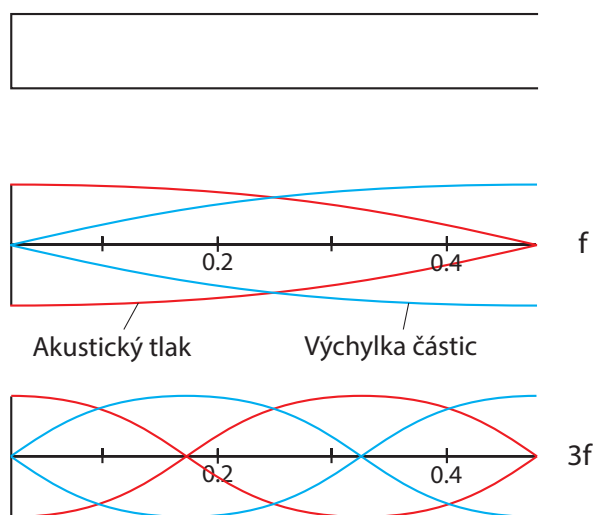
Nejrozměrnějším prvkem nástroje je jeho tělo, rozdělené na část horní a spodní. Ty jsou nejčastěji spojovány korkovými čepy, v případě levnějších nástrojů gumovými prstenci. Na povrchu jsou opatřeny tónovými otvory a mechanikou, která bývá zhotovena ze slitiny mědi, zinku a niklu, v některých často je navíc postříbřená. Vrtání celkové trubice se považuje za válcovité, ačkoli v blízkosti hubičky se mírně zužuje. Na druhé straně se ve spodní části začíná rozšiřovat, až přechází v kuželovitý korpus, nebo také ozvučník. Průměr vrtání se v případě válcovité části pohybuje okolo 15 mm a při jeho provedení je obzvláště dbáno na eliminaci jakýchkoli nepravidelností, které by mohly narušovat bezproblémové proudění vzduchu.

Výběr materiálu, jako u všech dřevěných nástrojů, je zásadní pro kvalitu tónu. Pro konstrukci klarinetu se využívá především grenadilové dřevo, jehož vlastnosti a tvrdost jsou zdrojem jeho charakteru. Podobně jako u plátků je výrobní proces relativně dlouhý, neboť zahrnuje několikaměsíční dozrávání a sušení k prevenci možných budoucích kazů. Častou materiálovou alternativou je umělá hmota ABS, která ačkoli nedosahuje kvalit výběrového grenadilového dřeva, dokáže plnohodnotně konkurovat nástrojům v nižších cenových relacích a není přirozeně tak náchylná na údržbu. Ta je v případě dřeva nezbytná pro udržení kvality, neboť nástroj prochází různými teplotními výkyvy a je vystavován působení vlhkosti dechu a slin. I když se z tohoto důvodu provádí prvotní impregnace nástrojovým olejem již při výrobě, bývá doporučeno provádět další impregnace svépomocí v intervalu jednoho roku. [6] V kontextu barvy zvuku pak hráči mluví o tónu grenadilového dřeva oproti umělé hmotě jako o hlubším, plnějším, měkčím či hladkým. Někdy také zmiňují lepší intonační vlastnosti, které se však na druhou stranu se stářím dřeva mohou zhoršovat.

Co se týče korpusu, je vyhotoven rovněž z grenadilu nebo jiných obdobných dřevin jako cocobolo. Na rozdíl od žesťových nástrojů, které nemají po své délce tónové otvory a zvuk je vyzařován roztrubem, neplní zcela funkci nástrojového radiátoru. To platí pouze pro nejnižší tóny každého rejstříku, zatímco vyšší tóny jsou vyzařovány tónovými otvory. Jeho odejmutí tak nemusí způsobit v případě některých tónů žádné zvukové změny. Prodlužuje však akustickou délku nástroje, snižuje kmitočet rezonančních módů a mírní neharmonické rozložení těchto módů. [7] Jinými slovy také „*zprodstředkovává hladký impedanční přechod z vnitřku trubice do okolního vzduchu rozšířením své vyzařovací plochy.*“ [4]

## 1.3 Princip tvorby tónu

Klarinet je z technického hlediska polouzavřená válcovitá trubice. Jak bylo uvedeno, klíčovým prvkem k tvorbě tónu je plátek. Ačkoli může sám o sobě kmitat a vydávat jistý zvuk, jeho výsledné chvění je především dáno rezonancemi vzduchového sloupce nástroje, dohromady tedy tvoří jednotný spřažený systém. Jestliže do mezery mezi hubičkou a plátkem proudí vzduch, rychlost jeho proudění je vyšší, než rychlost vzduchu vně plátku. V mezeře tak vzniká podtlak a plátek se přiblíží k hubičce. Toto náhlé přiblížení již produkuje na začátku vzduchového sloupce postupnou tlakovou vlnu, která se šíří k otevřenému konci trubice, resp. k nejbližším otevřeným tónovým otvorům či korpusu. V tomto bodě se pak z části rozšíří do všech směrů okolního vzduchu, zároveň je však v důsledku náhlé změny akustické impedance prostředí odražena zpět k uzavřenému konci trubice. Vzniká tak stojaté vlnění a nástroj produkuje tón. Energetické ztráty jsou tím menší, čím je vlnová délka tónu větší než vnitřní obvod trubice. V kontextu tlakových poměrů pak platí, že nejvyšší akustický tlak se nachází na uzavřeném konci trubice, tedy u hubičky, a nejnižší akustický tlak na konci otevřeném, kde je celkový tlak téměř shodný s tlakem atmosferickým. Z Bernoulliho principu pak vyplývá, že při stojatém vlnění dosahují částice vzduchu největší výchylky na otevřeném konci; tvoří se zde kmitna, zatímco na uzavřeném konci je jejich výchylka nejmenší; zde se nachází uzel. Toto pravidlo je také označováno jako *okrajové podmínky* a při jejich porušení stojaté vlnění zaniká. Četnost kmitů plátku pak odpovídá právě vlastním kmitům vzduchového sloupce. [7] [8]



Obr. 1.4: Stojaté vlnění v polouzavřené trubici. Překresleno z [9].

Z obr. 1.4 je dále zřetelné, že nejdelší možná vlna v nástroji má čtyřikrát větší vlnovou délku než je délka nástroje. Pro okrajové podmínky tedy platí:

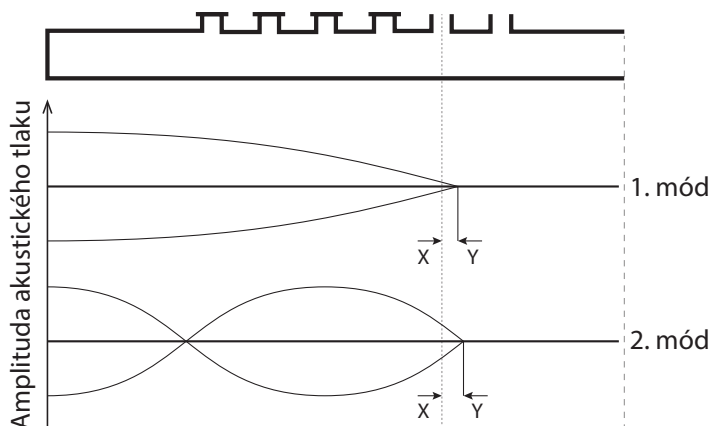
$$f_n = (2n - 1) \frac{c}{4l}, \quad (1.1)$$

kde  $n$  ... celé číslo,  $c$  ... rychlost šíření zvuku ve vzduchu a  $l$  ... délka trubice. Z toho plyne, že vzdušný sloupec klarinetu kmitá pouze na lichých násobcích kmitočtu základního rezonančního módu trubice nástroje a produkovaný tón se vyznačuje potlačenými sudými harmonickými složkami. Jakmile dojde při zvyšování tónu k vyčerpání základního rozsahu, lze dále zvyšovat výšku energetickým přebuzením kmitání vzduchového sloupce, tedy přefouknutím nástroje. Tím se základní výška tónu přesouvá na vyšší rezonanční mód, v případě klarinetu do duodecimy, resp. o oktávu a kvintu výše.

Při reálném průměru trubice je dále nutné uvážit, že funkční délka  $l_a$  kmitajícího vzduchového sloupce je delší o tzv. délkovou korekci  $K$ . „*Vysunutí pohybových kmiten či tlakových uzlů ven ze zvukovodu souvisí s postupným, nikoliv náhlým vyrovnáním hustoty částic vzduchu uvnitř a vně zvukovodu, resp. s vyzařováním zvuku ústím nástroje.*“ [7] Pro funkční akustickou délku  $l_a$  pak platí:

$$l_a = l_m + 0,6r, \quad (1.2)$$

kde  $r$  označuje poloměr vrtání nástroje. Podobný efekt vzniká také v případě zkracování trubice otevíráním tónových otvorů. Reálná akustická délka je o něco delší a pro správnou výšku tónu by měl být otvor předsazen směrem k hubičce o vzdálenost  $XY$ , která se nazývá korekce na tónový otvor.



Obr. 1.5: Vliv otevřeného tónového otvoru na rozložení rezonančních módů. Překresleno z [7].

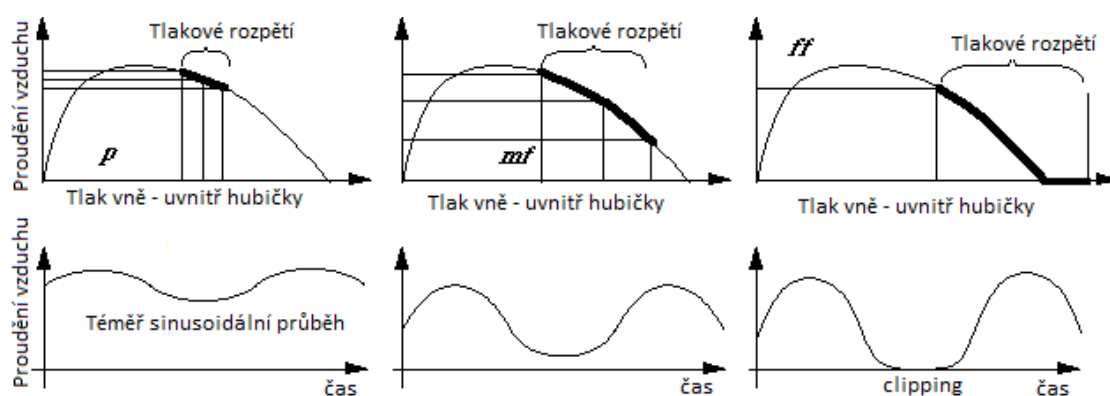
Tato délka se navíc ve vyšších rezonančních módech zvětšuje a tóny v přefukovacím režimu mají tendenci ladit níže, což byl také jeden z důvodů pro zavedení přefukovací klapky v místě teoretického vibračního uzlu. Nad určitým mezním kmitočtem se pak otevření tónových otvorů přestává zcela projevovat, resp. u vln vyšších harmonických složek zde nedochází k odrazu, což má za následek omezení kmitočtového rozsahu spektra tónu, který odpovídá určité konfiguraci otevřených tónových otvorů. [7] [9] Pro tento mezní kmitočet platí:

$$f_m \cong 0,11c \frac{d}{D} \sqrt{\frac{4}{s(4t + 3d)}} \quad (1.3)$$

kde  $c$  ... rychlost šíření zvuku,  $d$  ... průměr postranních tónových otvorů,  $D$  ... průměr vrtání trubice,  $s$  ... poloviční rozteč tónových otvorů a  $t$  ... délka tónového otvoru. Ze vztahu lze také vyvodit, že čím je vrtání užší, tím bohatší je spektrum na vyšší harmonické. [7]

### 1.3.1 Vliv herní dynamiky na spektrum

Skladba vyšších harmonických složek ve spektru klarinetového tónu se však mimo jiné liší především v závislosti na dynamice hry. Síla dechu způsobuje „nedokonalosti“ ve chvění plátku, což dává za vznik vyšším harmonickým tónům, které jsou pak zesilovány či tlumeny charakteristickými rezoncemi trubice. Ačkoli plátek je schopný produkovat relativně plné spektrum s lichými i sudými harmonickými složkami, zejména v případě nízkých tónů jsou zesíleny pouze liché. Při prvním přefouknutí tento efekt zeslabuje, až ve vyšších polohách prakticky úplně vymizí, což je důsledkem otevřeného přefukovacího otvoru, který není impedančně rovnocenný otevřenému konci nástroje. [7] [9]



Obr. 1.6: Vliv dynamiky hry na proudění vzduchu do nástroje. Převzato z [9].



Jak pohyb plátku ovlivňuje kmitání vzduchového sloupce ilustruje výše uvedený obr. 1.6. Horní řádek grafů znázorňuje proudění vzduchu do nástroje v závislosti na rozdílu tlaku vzduchu uvnitř a vně hubičky odvozeného od síly hráčova dechu. Část grafu, ve které křivka roste, odpovídá pouze postupnému zvyšování průtoku vzduchu bez jakéhokoli zvukového projevu, neboť rozdíl tlaků není dostatečný k rozkmitání plátku. V části, kde křivka začíná klesat, pak klarinet přechází do operačního režimu; plátek kmitá a střídavě propouští větší či menší objem vzduchu, čímž se rozkmitá i vzduchový sloupec. Tento průběh v časovém kontextu znázorňuje spodní řádek.

Dále, při hře v dynamice *piano* je odpovídající úsek levého horního grafu přibližně lineární a závislost proudění vzduchu na čase má tvar blízký sinusoidě. Fundament výsledného tónu dominuje nad vyššími harmonickými a zvuk je měkký, podobný flétnovému. V dynamice *mezzoforte* dochází k nárůstu tlakového rozdílu a rozpětí objemu vzduchu, který je do nástroje propouštěn, resp. plátek kmitá rychleji. Jeho kmitočet je však stále stejný, dosahuje pouze větší výchylky. Výsledné vlnění bude teoreticky více strmé, čímž vzniká více vyšších harmonických složek a jejich intenzita poroste. V dynamice *forte* se pak otvor mezi hubičkou a plátkem na část periody zcela uzavře a ve vlnění se vyskytne výrazný ostrý přechod nebo hrana, což dá za vznik dalším a intenzivnějším vyšším harmonickým složkám. To se také projeví zvýšením vjemu hlasitosti a tón bude průraznější, ostrý až řezavý.

Unikátní barevný projev jednotlivých nástrojů však ve výsledku dotváří i detailní provedení konstrukce, nepravidelnosti a rozličnosti v umístění, průměru či opracování tónových otvorů, stejně jako použitý materiál pro jednotlivé části. [9][10]

### 1.3.2 Klarinetové rejstříky

Dle barvy a s ní spojeného rozsahu se nakonec rozlišují tři, v některých zdrojích čtyři základní klarinetové rejstříky [10]:

- *Šalmajový* rejstřík se nejčastěji používá ve vztahu k tónům v rozmezí znělého  $d - gis_1$ . Výrazný podíl lichých harmonických složek oproti sudým dodává tónu specifický „dutý“ zvuk. Kmitočet fundamentu je dán prvním rezonančním módem trubice.
- *Klarinový* rejstřík zahrnuje tóny  $a_1 - b_3$ , kterých lze dosáhnout přefouknutím do druhého a třetího rezonančního módu trubice. Tón je sytější a zmenšují se poměry mezi lichými a sudými harmonickými složkami.
- *Altissimový* nebo jednoduše *vysoký* rejstřík pak pokrývá tóny  $h_3 - b_4$  dané třetím a čtvrtým rezonančním módem trubice. Tón je ostrý a liché harmonické již nepřevažují nad sudými.

## 2 Zvuková barva

V předchozí kapitole je k nastínění zvukových vlastností použito mnoho výrazových prostředků, které jsou založeny především na předchozích poslechových zkušenostech a asociacích jedince. Vzhledem k subjektivní rovině takových charakteristik je zřejmé, že dva lidé se nemusejí při popisu stejného zvuku vždy zcela shodnout. Při popisu tónu je člověk zvyklý charakterizovat jeho vlastnosti pomocí čtyř subjektivních veličin jako je výška, hlasitost, subjektivní doba trvání a objem či plnost. První tři z těchto veličin lze dnes označit za základní atributy sluchového vjemu, které je zároveň možné spojit s konkrétními fyzikálními veličinami jako kmitočet, hladina akustického tlaku a čas. Čtvrtý zmíněný atribut se však řadí pod širší pojem *barva zvuku*, který zahrnuje řadu dílčích a povětšinou obtížně definovatelných subjektivních veličin. [7] [11]

### 2.1 Subjektivní hodnocení barvy zvuku

Sluchový vjem barvy je často popisován mnoha přívlastky, jejichž význam se může překrývat, nebo jsou závislé na vyjadřovacích schopnostech, popřípadě zcela odlišném jazykovém či kulturním prostředí. V průběhu let se tímto fenoménem zabývalo několik fyziků či psychologů, až v 19. století H. von Helmholtz formuloval první teorii slyšení, úzce spjatou s Fourierovým matematickým aparátem, tedy rozkladem složeného tónu do řady jednoduchých harmonických signálů. U hudebních zvuků také vymezil tři fáze jejich časového průběhu: nakmitávací pochody, výdrž tónu a pochody dokmitávací, přičemž hudební interpretaci zvukové barvy přiřadil výdrži, resp. zakmitanému stavu tónu vzhledem ke stabilitě jeho kmitočtového spektra. Po důkladném zkoumání různých tónů definoval Helmholtz základní souvislosti vjemu zvukové barvy v závislosti na skladbě kmitočtového spektra následovně:

1. *Jednoduché tóny podobající se základnímu sinusovému průběhu, které generují kupříkladu široce menzurované varhanní píšťaly, znějí velmi měkce a příjemně, bez drsnosti a v nízkých polohách temně a tupě.*
2. *Komplexní tóny, v jejichž spektru jsou zastoupené převážně harmonické složky do pořadového čísla 6, znějí plně a „hudebně“. Ve srovnání s jednoduchými tóny jsou zvukově bohatší. Absence harmonických vyšších pořadových čísel způsobuje jejich „libozvučnost“ a měkkost. Takové tóny jsou typické pro klavír či nízké dynamiky dechových nástrojů.*
3. *Komplexní tóny, v jejichž spektru převládají liché harmonické složky, jako v případě klarinetu a úzce menzurovaných krytých varhanních píšťal, znějí dutě a při větším počtu vyšších harmonických huhňavě či nasálně.*

4. *Pokud ve spektru komplexního tónu převažuje první harmonická, působí takový tón plně a široce, v opačné situaci převahy vyšších složek je tón prázdný a úzký. Tento rozdíl je typický mezi široce a úzce menzurovanými retnými varhanními píšťalami, mezi plátkovými píšťalami s přirozenou délkou ozvučny, nebo také mezi klavírem a cembalem.*
5. *Komplexní tóny, v jejichž spektru se nachází intenzivní harmonické složky nad 6. či 7. složkou, působí ostře a drsně. Míra ostrosti se může velmi lišit v rámci jednotlivých zvukových zdrojů, jako např. u plechových či dřevěných dechových nástrojů, u smyčcových nástrojů či lidského hlasu apod. a zřetelně tyto nástroje odlišuje. [7]*

Později pak dodatečně vyřkl relativní a absolutní teorii barvy zvuku, které jsou již více zobecněné a vztažené ke své fyzikální podstatě:

- Barva zvuku je určena počtem a intenzitou jednotlivých harmonických složek. U tónů hudebních nástrojů jsou poměry jednotlivých složek spektra nezávislé na jejich absolutní výšce, zatímco u vokálů je barva určena existencí jedné nebo dvou charakteristických oblastí, které jsou ve zvuku zvýrazněné a jsou pevně spjaté s jejich absolutní výškou. [7]

Prakticky lze toto tvrzení interpretovat tak, že u hudebních tónů je vjem barvy zvuku při zachování intenzit harmonických složek stejný při jakékoli výšce základního kmitočtu, zatímco u vokálů je vjem barvy daný zmíněnými oblastmi, dnes již známými pod pojmem tzv. *formanty*.

Reakcí na Helmholtzova tvrzení byl vzestupný zájem o problematiku subjektivního zvukového vnímání a začala se formovat odnož psychoakustiky, spojující fyzikální a fyziologickou akustiku s hudební psychologíí a estetikou. Jejím zásadním představitelem byl v počátcích C. Strumpf. Pro upřesnění Helmholtzovského pojetí dále vytvořil jasně protichůdné páry jako *tmavý - světlý, tupý - ostrý, plný - dutý*, nebo také klasifikoval plnost a hustotu či ostrost a světlost v závislosti na počtu harmonických složek. Podle intenzity 1., 2. a 3. harmonické složky pak přisuzoval zvuku pojmy jako kulatý a plný, podle zvýšené intenzity 1. a 3. harmonické složky pojmy dutý a prázdný. [7]

Dnes jsou již jisté pojmy podloženy množstvím poslechových výzkumů, ve kterých panuje většinová shoda. Obecně se přítomnost sudých harmonických složek přisuzuje vjemu jasnosti, hloubky a pronikavosti. Liché harmonické složky pak tón zostřují, zvýrazňují a činí jej dutějším, hrdelním, nebo také bohatším. Takové tvrzení se však vztahuje především k harmonickým složkám v prvním pásmu, tedy s pořadovým číslem 1 až 8. [12] [23]

## 2.2 Objektivní hodnocení barvy zvuku

„Objektivní hodnocení barvy zvuku jako subjektivní veličiny je podmíněno její převoditelností do podoby čísla, které by s dostatečnou přesností vyjadřovalo obecně akceptovatelný subjektivní postoj k hodnocené barvě zvuku.“ [7]

Zatímco kmitočtové spektrum lze reprezentovat dvojrozměrně, nebo trojrozměrně při analýze jeho časového vývoje, sluchový vjem lze stanovit pouze na základě subjektivních výpovědí daných slovním popisem. Některým z těchto popisů však lze přiřadit konečné číslo na základě korelace jeho hodnoty s odpovídajícím subjektivním vjemem. Ačkoli se nedá mluvit o jednoznačně potvrzených elementárních dimenzích barvy zvuku, je například ve zdroji [11] uvedeno, že k popisu barvy stačí tři nebo čtyři elementární percepční dimenze, které jsou již všeobecně uznávány. Patří mezi ně *ostrost*, *objem* či *plnost*, *drsnost*, *tónovost* a *jasnost*. Také názor, že jediným fyzikálním korelátem barvy tónu je jeho kmitočtové spektrum v zakmitaném stavu, je dnes víceméně překonán, neboť určitý vliv na výsledný vjem barvy mají i přechodové jevy na začátku a konci tónu. Podobně jako ve zdroji [13] je však v praktické části kladen důraz na spektrální změny bez ohledu na nakmitávací a dokmitávací pochody, neboť v případě klarinetu nemají takovou váhu jako v případě např. perkusivních nástrojů. Práce pak dále pracuje s následujícími:

- *Ostrost* vychází již z Helmholtzových poznatků, kdy používal pojem „ostrý“ při zdůraznění vyšších harmonických složek počínaje šestou či sedmou. Značí se symbolem  $S$  a její jednotka je nazývána acum. Její matematický model je založen na hodnotě subjektivní hlasitosti v tzv. kritických pásmech. Ty jsou zjednodušeně definovány jako nejširší kmitočtová pásma, uvnitř kterého je hlasitost pásma spojitě rozloženého zvuku o konstantní hladině akustického tlaku ještě nezávislá na šířce pásma. [11] 1 acum je pak definován jako ostrost úzkopásmového šumu o šířce kritického pásma se středním kmitočtem 1000 Hz a s hladinou akustického tlaku 60 dB.
- *Jasnost*, značená  $BR$ , je naproti tomu podle Beauchampa ve zdroji [7] definována podílem harmonických složek ve spektru tónu podle rovnice:

$$BR = \frac{\sum_{k=1}^n k c_k}{c_0 + \sum_{k=1}^n c_k}, \quad (2.1)$$

kde  $n$  je počet uvažovaných harmonických složek,  $c_k$  je velikost  $k$ -té harmonické složky v lineárním měřítku a  $c_0$  je prahová velikost užitečné harmonické složky.

- *Tonalita* je ze všech veličin nejméně ustálená a matematické modely se často velmi liší. Shoda panuje především v použití bezrozměrné jednotky často udávané v procentech. Hodnota nejčastěji vyjadřuje poměr harmonických složek vůči neharmonickým v kontextu úzko či širokopásmového signálu. Konkrétní výpočet je dále uveden v kap. 4.1.1.

## 3 Metody spektrální analýzy

Aby bylo možné v kontrastu se sluchovým vjemem zvukové barvy objektivně vyhodnocovat rozdíly ve spektru různých nástrojů, je zapotřebí uvést základní matematické postupy, které tuto diskuzi umožní. Ačkoli je zde uvedeno více metod, kterými lze charakter spektra popsat, všechny prakticky vychází z Fourierovy transformace.

### 3.1 Diskrétní Fourierova transformace

Fourierova transformace je základním matematickým prostředkem k převedení průběhu amplitudy signálu v čase do kmitočtové domény, kdy je složený signál vyjádřen jako lineární dekompozice základních harmonických průběhů. Díky tomu je možné spektrum důkladně analyzovat a určovat počet či intenzitu vyšších harmonických složek. Diskrétní Fourierova transformace DFT (Discrete Fourier Transform) je pak vztažena výhradně k navzorkovaným, tedy v čase (zpravidla i v úrovni) diskretizovaným, resp. digitálním signálům.

Pro odvození vzorce je nejdříve zapotřebí uvést základní vztah pro výpočet kmitočtového spektra periodického spojitého signálu:

$$\mathbf{X}(k) = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} x(t) e^{-j\omega k t} dt. \quad (3.1)$$

Při navzorkování periodicky se opakujícího úseku o délce  $T$  počtem vzorků  $N$  lze dále ve tvaru:

$$\mathbf{X}(k) = \frac{1}{T} \int_0^T x(t) e^{-j\omega k t} dt \quad (3.2)$$

zavést substituci prvků:

$$T = NT_{vz}; \quad dt = T_{vz}; \quad x(t) = x(n); \quad \int_0^T = \sum_{n=0}^N; \quad t = nT_{vz} \quad (3.3)$$

a tím dosáhnout vzorce:

$$\mathbf{X}(k) = \frac{1}{NT_{vz}} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\omega k n T_{vz}} T_{vz}. \quad (3.4)$$

Úpravou úhlového kmitočtu:

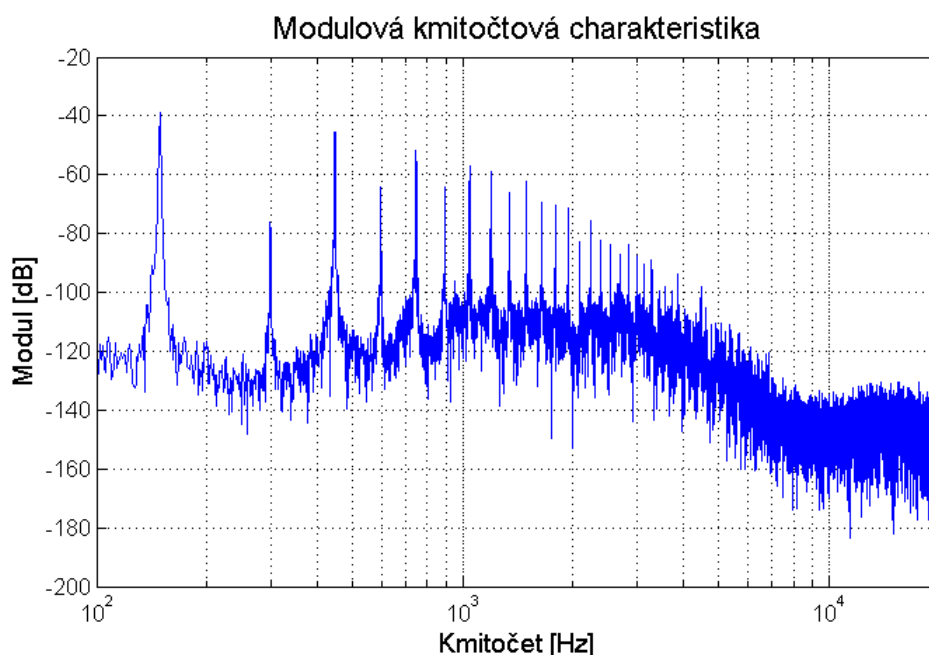
$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{2\pi}{NT_{vz}} \quad (3.5)$$

a vykrácením vzorce 3.4 je dán přímý vztah pro DFT:

$$\mathbf{X}(k) = \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N-1} x(n) e^{-j\frac{2\pi}{N} nk}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1, \quad (3.6)$$

kde  $n$  označuje odpovídající vzorek v čase a  $k$  odpovídající vzorek v kmitočtu. Výsledkem přímé DFT je tedy posloupnost komplexních spektrálních koeficientů  $\mathbf{X}(k)$  definujících intenzitu spektra v bodech, jejichž počet je dán délkou vstupní posloupnosti  $x(n)$ . Spektrální koeficienty jsou pak nejčastěji zobrazeny ve formě modulové kmitočtové charakteristiky, kde je modul dán absolutní hodnotou spektrálních koeficientů v logaritmickém měřítku. Podobně je také přistupováno ke kmitočtové ose, neboť lidské ucho tyto veličiny vnímá právě logaritmicky. [15] [16]

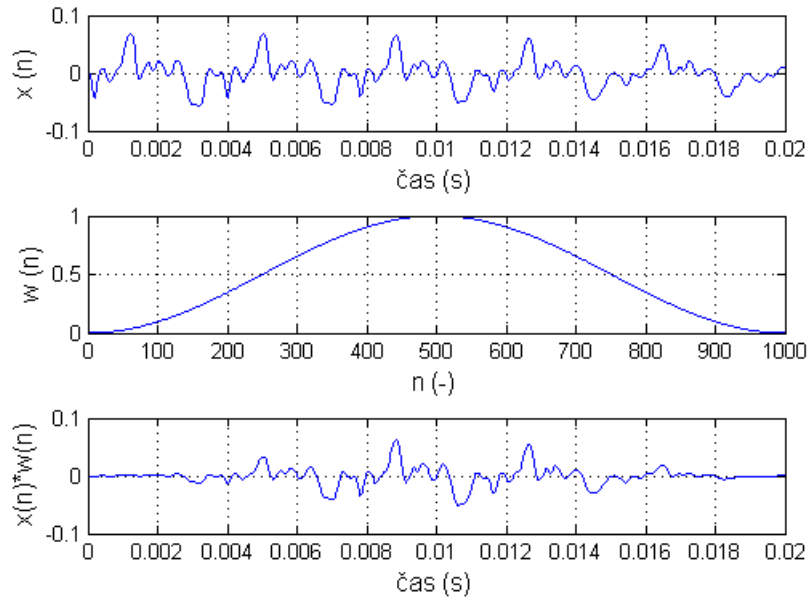
Je vhodné dodat, že uvedený vztah DFT platí pouze pro dvoustranné spektrum zrcadlené podle Nyquistova kmitočtu, který odpovídá hodnotě  $f_{vz}/2$ . V kontextu práce má význam pouze „polovina“ tohoto spektra, jejíž intenzitu je pak za účelem zachování energetických poměrů nutné zdvojnásobit. Neméně důležitý je potom fakt, že při dnešních výpočtech se místo DFT používá především algoritmus rychlé Fourierovy transformace FFT (Fast Fourier Transform), který se zvyšujícím se počtem vstupních vzorků  $N$  rapidně snižuje počet nezbytných výpočetních operací. Zatímco u přímé DFT je zapotřebí  $N^2$  komplexních operací, při FFT je jich potřeba pouze  $N/2 \log_2 N$ .



Obr. 3.1: Modulová kmitočtová charakteristika klarinetového tónu;  $N = 48000$ .

### 3.1.1 Váhovací okna

V reálných aplikacích FFT je časté, že analyzovaný signál vstupující do algoritmu se periodicky neopakuje. Jinými slovy, pokud by byl vytvořen delší signál ze dvou identických neperiodických kratších signálů, vznikne na jejich hranici nespojitost. To se v praxi projeví tzv. „prosakováním“ energie do spektra. Důsledkem může být snížení odstupů užitečných složek od šumu či vznik spektrálních čar, které neodpovídají skutečnému charakteru analyzovaného signálu. Jedním ze základních prostředků k ošetření tohoto problému je použití váhovacích oken, jejichž princip je nastíněn na obr. 3.2.



Obr. 3.2: Použití váhovacích oken.

Vstupní vzorky  $x(n)$  jsou násobeny hodnotami okna  $w(n)$  a hodnoty krajních vzorků výsledné posloupnosti se potom blíží nule. Při aplikaci FFT je tím prosakování minimalizováno a spektrum není zatíženo nesouvisejícími složkami, zmenší se však efektivní hodnota analyzovaného úseku. Typů oken je více a na jejich tvarech také závisí výsledné kmitočtové rozlišení, bližší popis lze najít např. ve zdroji [15]. Na uvedeném příkladu je potom použito jedno z nejběžnějších oken Hannovo, jehož průběh je dán vztahem:

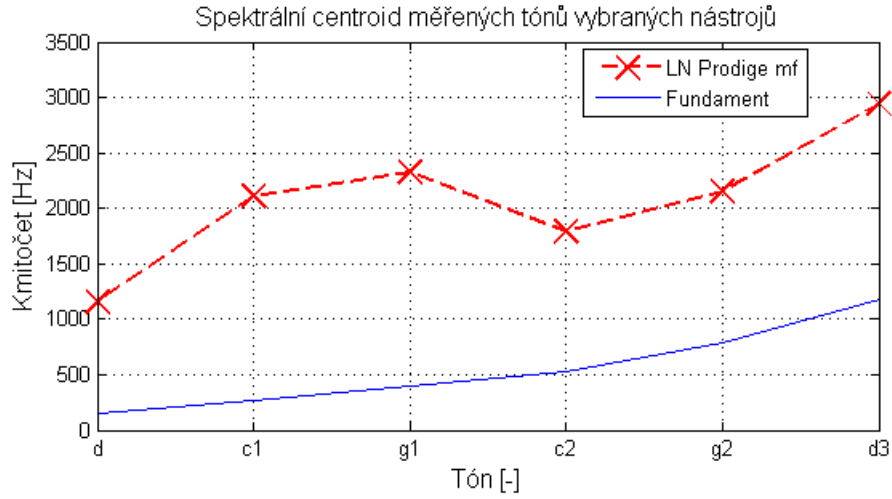
$$w_{hann}(n) = 0,5 \left( 1 - \cos \left( \frac{2\pi n}{N-1} \right) \right), \quad n = 0, 1, \dots, N-1. \quad (3.7)$$

### 3.1.2 Spektrální centroid

Jednou z rozšířených doplňkových metod popisujících charakter spektra je v souvislosti s Fourierovou transformací spektrální centroid. Jeho hodnota vyjadřuje kmitočtovou polohu energetického těžiště spektra, kterou lze spočítat vztahem:

$$SpC = \frac{\sum_{k=1}^N f(k)c(k)}{\sum_{k=1}^N c(k)}, \quad (3.8)$$

kde  $c(k)$  značí intenzitu spektrálních koeficientů a  $f(k)$  jejich střední kmitočet. Jedná se svým způsobem o podobné vyjádření vjemu *jasnosti*, který je popsán na konci kapitoly 2.2 s tím rozdílem, že zde jsou v rovnici uvažovány všechny spektrální koeficienty, ne pouze harmonické složky. Náznorný příklad vykreslení spektrálního centroidu pro vzestupně seřazené klarinetové tóny v porovnání s kmitočtem fundamentu pak lze vidět na obr. 3.3.



Obr. 3.3: Grafické zobrazení spektrálního centroidu.

### 3.1.3 Spektrální roll-off

Za relevantní v kontextu práce lze také označit tzv. spektrální roll-off, který označuje kmitočet, pod kterým je koncentrována předem určená procentuální část celkové energie spektra. Pro spektrální roll-off platí

$$\sum_{k=1}^{f_r} c(k) = p \sum_{k=1}^N c(k), \quad (3.9)$$

kde  $f_r$  vyjadřuje střední kmitočet spektrálního koeficientu, pod kterým je koncentrováno  $p$  z celkové energie spektra. Tato hodnota se nejčastěji volí v rozmezí 0.85 - 0.95 a může sloužit jako rozlišovací bod mezi tónovou složkou a šumem. [17]



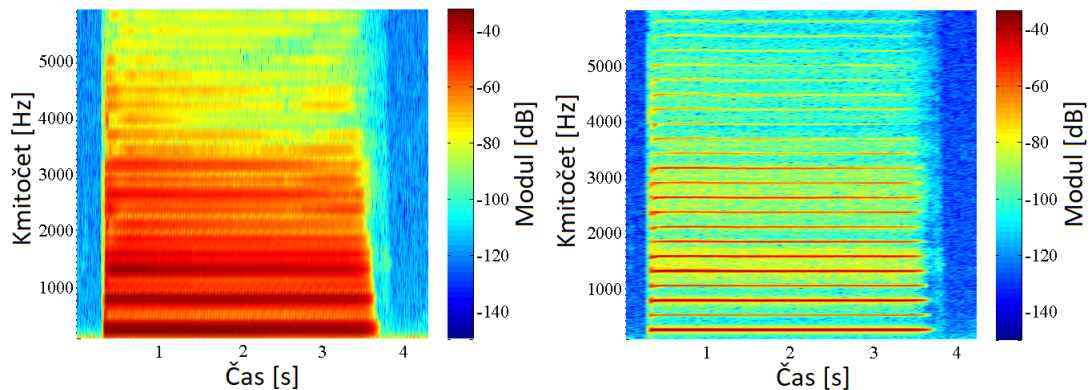
## 3.2 Krátkodobá Fourierova transformace

Ačkoli má FFT nepostradatelnou výpovědní hodnotu při analýze spektra, doposud byla vztahována k jednorázovému popisu i časově proměnných signálů. S pomocí FFT samé však nelze sledovat spektrální změny v čase, nebo vývoj intenzity harmonických složek v různých fázích tónu. Pro tyto účely byla zavedena krátkodobá Fourierova transformace STFT (Short Time Fourier Transform), jejímž principem je segmentace signálu do kratších úseků, kdy je provedena FFT pro každý úsek zvlášť.

Klíčovým je zde především použití specifických typů váhovacích oken k segmentaci a jejich zvolená délka, která má největší vliv na výsledné zobrazení, tzv. spektrogram. Pro STFT dle [18] platí:

$$\mathbf{X}(n, k) = \frac{1}{N} \sum_{m=0}^{N-1} x(hn + m)w(m)e^{-j\frac{2\pi}{N}nk}, \quad k = 0, 1, \dots, N-1, \quad (3.10)$$

kde  $N$  označuje délku okna,  $n$  definuje pořadové číslo aktuálního segmentu a  $h$  jeho posun. Výsledkem jsou tedy segmenty definující intenzitu spektrálních koeficientů přes čas a kmitočet, přičemž časově-kmitočtové rozlišení je dáno zvoleným parametrem  $N$ . Jak bylo již uvedeno, tímto parametrem je ovlivněn počet koeficientů popisujících spektrum. Čím větší  $N$  bude, tím lze logicky dosáhnout většího rozlišení v kmitočtu, tento fakt je však kompenzován nižším rozlišením v čase, neboť je segmentace prováděna v delších časových krocích. Pro různé aplikace je nutné hledat vyhovující kompromis, v některých případech jsou však běžné i alternativy v podobě variabilní segmentace, kdy je délka okna proměnlivá v závislosti na sledovaném parametru v signálu. Podle zvoleného typu okna k segmentaci je navíc zapotřebí zavést jistý přesah sousedících segmentů, aby byly zachovány správné energetické poměry signálu. Pro uvedené Hannovo okno v kapitole 3.1.1. je například potřebná hodnota přesahu 50 % z celkové délky okna. [19]



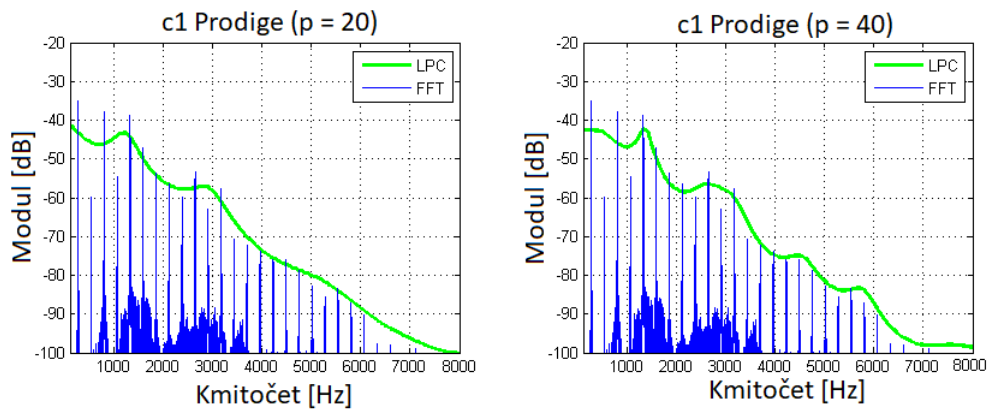
Obr. 3.4: Spektrogram *a*:  $N = 256$  vzorků; Spektrogram *b*:  $N = 2048$  vzorků.

### 3.3 Lineární prediktivní kódování

Lineární prediktivní kódování, zkráceně LPC, je metoda používaná především při zpracování řečových signálů, resp. při stanovování jejich formantů. Ke stejným účelům ji však lze použít i při analýze formantů hudebních nástrojů. Principem metody je odhad vzorku signálu z předchozích  $p$  vzorků. Platí:

$$\hat{s}(n) = \sum_{k=1}^p \alpha_k s(n - k), \quad (3.11)$$

kde  $\hat{s}(n)$  je odhad  $n$ -tého členu v posloupnosti, který je spočten jako lineární kombinace  $p$  předešlých vzorků. Symbol  $p$  také označuje řád LPC, nebo-li počet koeficientů a  $\alpha_k$  značí predikční koeficienty. Cílem je nalezení optimálních  $\alpha_k$  tak, aby každá hodnota signálu byla co nejblíže lineární kombinaci předchozích vzorků. Těmito koeficienty je pak dána spektrální charakteristika signálu, která má podobu „vyhlazeného“ spektra při výpočtu FFT. Míru vyhlazení ovlivňuje zejména predikční řád  $p$ , jehož vliv lze vidět na obr. 3.5, kde jsou zároveň formanty definované několika maximy, zejména v oblasti kmitočtu 1200 Hz a 2800 Hz. K výpočtu koeficientů se pak nejčastěji používá autokorelační metoda či metoda kořenů, blíže popsáno v [20].



Obr. 3.5: Porovnání FFT a LPC s různě volenými predikčními řády.

## 4 Implementace metod v prostředí MATLAB

V rámci praktické části práce jsem vypracoval ve výpočetním prostředí MATLAB skripty, které lze rozdělit do třech kategorií. Ty se odvíjí od závěrečného způsobu vyhodnocování; v první řadě se jedná o výpočty popisující rozdíly ve spektru, z jejichž výstupu jsou tvořeny komparační tabulky zahrnující rozdíly v úrovních harmonických složek v porovnání s psychoakustickými veličinami a spektrálními příznaky, tj. spektrální centroid a spektrální roll-off. V druhé řadě se jedná o skript k zobrazení LPC charakteristiky vzorků a vykreslení formantových oblastí. Výpočet a zobrazení směrových charakteristik pak popisuje poslední podkapitola.

### 4.1 Funkce k popisu spektra

Zásadní pomocnou funkcí, se kterou probíhá většina výpočtů je *FFTpomocny.m*. Jejími vstupními parametry jsou vybraný naměřený vzorek a jeho vzorkovací kmitočet. V jádru je proveden výpočet FFT pomocí integrované funkce *fft*, následuje odstranění spektrálních koeficientů zrcadleného spektra a přepočet hodnot koeficientů na modul. Součástí je také určení fundamentu daného tónu a dohledání vyšších harmonických složek. To probíhá v několika krocích:

1. Pomocí integrované funkce *max* je nalezena nejintenzivnější harmonická složka. Ačkoli se ve většině případů jedná o fundament, zejména při vyšší dynamice se může jednat i o některou z vyšších harmonických složek.
2. Od získané hodnoty se odvíjí prahová úroveň pro použití další integrované funkce *findpeaks*, která nad stanovenou prahovou úrovní vyhledá všechna maxima. V žádném z případů nepřesahoval modul vyšší harmonické složky fundament o více než 5 dB, prahová hodnota je tedy nastavena na maximum z předešlého bodu a s rezervou snížena o 10 dB.
3. Je znovu provedeno hledání maxim, přičemž první lze již považovat za fundament.
4. Aby byla zajištěna co největší přesnost kmitočtů vyšších harmonických složek, je funkce *findpeaks* spuštěna ještě jednou, tentokrát s několikanásobně nižší prahovou hodnotou pro nalezení i nejtisších složek, zároveň je zahrnuto omezení, aby dvě sousedící maxima byla od sebe vzdálena o hodnotu kmitočtu fundamentu. Tato hodnota je také mírně snížena, v případě jistých inharmónicit nástroje.

Ke sledování časového průběhu intenzit harmonických složek je také dostupný skript *STFT.m*, nicméně je dále využíván jen okrajově při zjišťování charakteru nakmitávací či dokmitávací fáze.

## Inharmonicit

K ověření případných inharmonicit dále slouží skript *Inharmonicita.m*. V něm jsou nejdříve spočteny kmitočty vyšších harmonických složek, spočítá se procentuální odchylka od teoretických hodnot a dle rovnic ze zdroje [21] jsou tyto výsledky převedeny na odchylku v centech. Platí

$$C_{hi} = 1781.715 \left( \frac{n_{exp}}{n_{thy}} - 1 \right) \quad (4.1)$$

$$C_{lo} = 1681.715 \left( \frac{n_{exp}}{n_{thy}} - 1 \right), \quad (4.2)$$

kde  $n_{exp}$  označuje vypočítaný kmitočet dané harmonické složky a  $n_{thy}$  jeho teoretickou hodnotu. Rovnici 4.1 použije algoritmus v případě kladné procentuální odchylky, druhou rovnicí v opačné situaci.

## Spektrální příznaky

K výpočtu spektrálních příznaků je určen skript *SpCSpRO.m*. Lze jej spustit pro 6 tónů libovolného počtu nástrojů. V jádru je znovu provedeno FFT a výpočty dle rovnic 3.8 a 3.9. Po dokončení se vykreslí dva grafy, které znázorňují rozdíly v hodnotách pro jednotlivé tóny v porovnání s kmitočtem fundamentu.

### 4.1.1 Psychoakustické veličiny

Následující výpočty jsou zabudovány pouze v samostatné funkci *TabVypis.m*, jejíž výstup zahrnuje i výše uvedené skripty. Hlavní odlišnost tkví v nutnosti načtení kalibračního vzorku měřícího mikrofону, který je využit především při výpočtu ostrosti. Při spuštění této funkce jsou všechny hodnoty vypsány do matic v podobě odpovídající tabulkám v poslední kapitole.

## Ostrost

Skripty pro zpracování ostrosti jsem převzal ze zdroje [14]. Jedná se v podstatě o malý toolbox, jehož hlavním cílem je výpočet subjektivní hlasitosti v třetinooktávových či kritických pásmech. Protože ostrost je na hlasitosti z velké části závislá, je zapotřebí mít kalibrační signál, s jehož pomocí se přepočítá úroveň digitálního signálu na hladinu akustického tlaku. Při tom vycházím nejprve ze vztahu pro hladinu akustického tlaku

$$L_p = 20 \log_{10} \left( \frac{p}{p_0} \right). \quad (4.3)$$

Hladina akustického tlaku kalibrátoru na membránu mikrofónu odpovídá 94 dB<sub>SPL</sub>,

dále tedy dojde k odlogaritmování rovnice a substituci zlomku symbolem  $Z$  do následujícího tvaru

$$Z = 10^{\frac{94}{20}}. \quad (4.4)$$

Protože je měření prováděno pro jedno či dvousekundové vzorky v zakmitaném stavu, kdy je akustický výkon téměř konstantní, použije se získaná hodnota k vynásobení poměru efektivního signálu naměřeného a kalibračního vzorku:

$$x_{dB SPL} = \frac{x_{RMS}}{kalib_{RMS}} Z. \quad (4.5)$$

Získanou hodnotou lze znovu nahradit zlomek ve vztahu 4.3 a tím získat hladinu akustického tlaku měřeného vzorku, která poté vstupuje spolu se signálem vzorku do skriptů z uvedeného zdroje [14], které provedou výpočet ostrosti.

### Jasnost

Jak bylo řečeno, jasnost je dle provedení z kap. 2.2 do jisté míry podobná spektrálnímu centroidu, nicméně se vztahuje pouze k harmonickým složkám. Při výpočtu jsou znovu přes funkci *FFTpomocny.m* vypočítány úrovně vyšších harmonických složek a jejich kmitočty. Důležité je zde vymezení pásma, pro které mají harmonické složky ještě efektivní užitek. Vycházím zde z literatury [7], kde je uvedeno, že pro klarinet je horním mezním kmitočtem hodnota 12-13 kHz. Při bližším pozorování to platí zejména pro nejvyšší tóny, u nižších rejstříků je tento kmitočet níže, zároveň je však velmi proměnlivý dle dynamiky hry či použitých typů hubičky a plátku. Omezení pásma jsem tedy ponechal na 12 kHz; u spodních tónů jsou v této oblasti vyšší harmonické na úrovni šumu a výsledek ovlivní pouze v malé zanedbatelné míře.

### Tonalita

Výpočet tonality jsem na základě informací v práci [22] založil na měření tzv. plochosti spektra, kterou lze spočítat vztahem

$$SFM = \frac{\sqrt[N]{\prod_{k=0}^{N-1} P(k)}}{\frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} P(k)}. \quad (4.6)$$

Jedná se o poměr geometrického a aritmetického průměru spektrální hustoty výkonu zkoumaného vzorku. V MATLABu ji lze spočítat funkcí *periodogram*, podobně jsou také dostupné funkce *geomean* a *mean* k počítání obou typů průměrů. Tonalita se ze získané hodnoty přepočítá dle vztahů

$$SFM_{dB} = 10 \log_{10} SFM \quad (4.7)$$

$$T = \frac{SFM_{dB}}{-60}. \quad (4.8)$$

Jedná se o bezrozměrnou jednotku, kterou lze dále přepočítat na procenta. Při testování jednoduchého harmonického průběhu, kdy by měla hodnota tonality vykazovat teoretické maximum, tedy hodnotu 100 %, však výsledek činil 115 %. Experimentálně jsem pak konstantu ve vztahu 4.8 snížil na -70, kdy již tonalita náhodně generovaného šumu vykazovala hodnoty v rozmezí 1 - 2 % a v případě jednoduchého harmonického průběhu 99 - 99,5 %.

## 4.2 Analýza formantových oblastí

K formantové analýze slouží skript *LPC.m*, který funguje pro šest libovolných vzorků současně. K výpočtu koeficientů LPC jsem využil integrovanou funkci *lpc*, která funguje na autokorelačním principu. Pomocí funkce *freqz* je pak z koeficientů vytvořena spektrální charakteristika vybraného vzorku a následně je zároveň s modulovou kmitočtovou charakteristikou vykreslena do stejného grafu. Protože je podoba spektra v závislosti na výšce tónu velmi proměnlivá, bylo zapotřebí adekvátně měnit predikční řád. Pro nižší tóny se osvědčil řád vyšší, pro vyšší tóny naopak. Obecně se hodnoty pohybovaly v rozmezí 30 - 50, přičemž u dvou nejvyšších tónů zmíněných později nebylo možné nadále formanty identifikovat. Pro ověření nalezených kmitočtů formantů jsem do skriptu také přidal řešení dostupné na domovské stránce MATLABu, které funguje na principu metody kořenů, jejímž výstupem jsou přímo číselné hodnoty nalezených formantů.

## 4.3 Výpočet směrových charakteristik

Skript k výpočtu směrových charakteristik *SmerovostHarm.m* je znovu optimalizován pro 6 libovolných vzorků a je vhodné jej rozdělit do několika kroků.

1. V první části je uživatel vyzván k načtení kalibračních signálů všech mikrofónů, které byly při měření dostupné. Pro každý z mikrofónů je spočtena konstanta odpovídající převrácené hodnotě efektivní hodnoty signálu, která se uloží do paměti.
2. Ve druhé části je uživatel postupně vyzván k načítání vzorků jednotlivých nástrojů, přičemž je nutné dodržet pořadí, ve kterém jsou signály z mikrofónů vybírány. Jednotlivé signály jsou pak násobeny konstantami z prvního bodu za účelem normalizace vstupní citlivosti.
3. Pro každý signál je volána funkce *FFTpomocny.m* a jsou spočteny úrovně vyšších harmonických složek. Zde je nutná poznámka; hodnoty úrovní harmonických složek se v tomto případě nebudou absolutně shodovat s hodnotami uvedenými v tabulkách. Je to dáno násobením signálu normalizační konstantou

a také nemožností normalizace získaných hodnot počtem vzorků vstupní posloupnosti, jak je uvedeno ve vztahu 3.6. To je dáno použitou verzí MATLABu, která neumožňuje vykreslení negativních hodnot v polárním diagramu. Je tedy zásadní, aby v takovém případě měly signály z každého mikrofону stejnou délku.

4. V posledním kroku jsou nakonec vykresleny jednotlivé diagramy. Pokud je zvolen výpočet pro 6 vzorků, vykreslí se do jednoho okna celkem 12 diagramů, resp. vždy dva diagramy vedle sebe v celkem šesti řádcích. V závislosti na zvoleném počtu harmonických složek k analýze se vždy jedna polovina vykreslí do levého diagramu, druhá polovina pak do pravého, aby byly jednotlivé složky lépe čitelné.

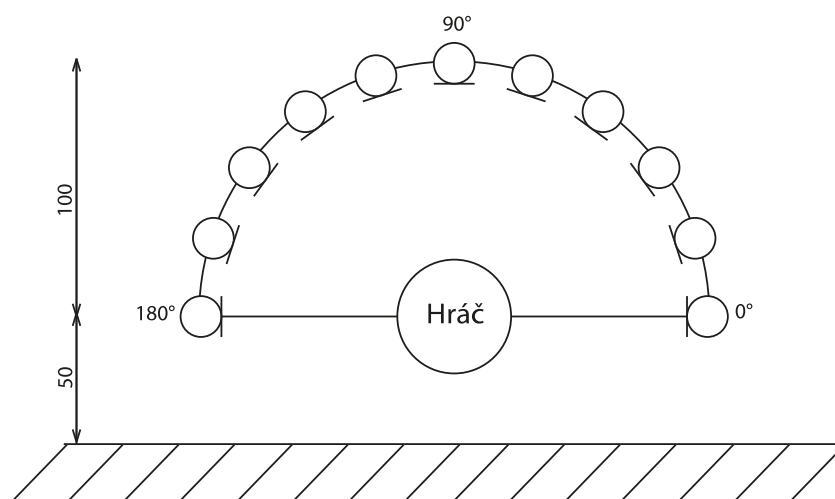
## 5 Realizace měření

Měření probíhalo na půdě fakulty elektrotechniky a komunikačních technologií VUT v Brně za dozoru vedoucího práce. Pro dosažení co nejméně zkreslených výsledků vlastnostmi a odrazy prostoru byly všechny záznamy provedeny v bezodrazové komoře. Při měření byli přítomni dva hráči, jejichž technika hry i použitá hubička s plátkem byly mírně odlišné. To především z toho důvodu, aby bylo možné analyzovat jak se mění barva nástrojů i v kontextu rozdílného nátisku a tloušťky plátků. Optimální by byla přirozeně varianta, ve které by měření bylo provedeno pomocí tzv. „umělých úst“, zajišťujících stejnou dynamiku a nátisk, ta bohužel nebyla k dispozici.

### 5.1 Metoda snímání

#### 5.1.1 Mikrofonní pole

Prvním krokem při přípravě měření bylo rozmístění mikrofónů. Klarinet je nástrojem vyzařujícím svou energii především čelem od hráče, tudíž byl před hráčem vytvořen půlkruh z celkem 11 mikrofónů o poloměru 1 m, přičemž krajní mikrofony byly vzdáleny 0,5 m od zadní stěny. Rozmístění pak probíhalo pomocí laserového úhlooměru s krokem  $18^\circ$ , což odpovídá celkem jedenácti rovnoměrně rozestaveným bodům nezbytným k objektivním výpočtům.



Obr. 5.1: Rozmístění mikrofónů při měření.

Na střed obvodu půlkruhu byl umístěn jeden referenční mikrofon, sloužící k měření spektra. Aby byly co nejvíce eliminovány výškové rozdíly hráčů, byla do středu



pomyslné kružnice umístěna židle a mikrofony nastaveny do výšky 1,15 m ve vodorovné poloze. To odpovídalo přibližně výšce, ve které se u sedícího hráče nachází předěl mezi spodní a horní částí klarinetu. Podle literatury [7] je v tomto směru také vyžářeno nejvíce energie na všech kmitočtech. Na každý mikrofon byl dále nahrán pětisekundový vzorek kalibračního signálu, tj. signál kalibrátoru o kmitočtu 1 kHz s konstantně definovaným akustickým tlakem ve své komoře, kterým působí na membránu mikrofonu. Dle tohoto signálu byly nastaveny hodnoty vstupní citlivosti na předzesilovači, nicméně pro přesné výpočty je vždy nutné vzorky normalizovat, jak je uvedeno v kap. 4.3.

### 5.1.2 Prvky měřícího řetězce

K měření směrových charakteristik byly k dispozici mikrofony typu AUDIX TM1. Jedná se o všesměrový kondenzátorový mikrofon s širokopásmovou a vyrovnanou kmitočtovou charakteristikou v rozsahu 20 - 25000 Hz, s mírným poklesem citlivosti v oblasti 5 - 10 kHz. Citlivost mikrofonů odpovídá 6 mV/Pa. Odstup signálu od šumu činí 66 dB, pro měření i nejtěžší dynamiky však byly dostačující a nijak zásadně neovlivňovaly výsledné hodnoty.

Jako referenční mikrofon k měření spektra byl dostupný BrüelKjær 4189. Vyniká svou plochou kmitočtovou charakteristikou i na vyšších kmitočtech, zároveň také disponuje několikrát vyšší citlivostí, která odpovídá hodnotě 50 mV/Pa. Odstup signálu od šumu je větší než u předešlého modelu, nicméně konkrétní hodnota není na stránkách výrobce uvedena.

Signál z mikrofonů byl dále veden do zvukových karet značky M-AUDIO řady PROFIRE. Digitální signál byl pak zaznamenán v DAW *Cubase*, kde byl bez jakýchkoli zásahů zeditován do potřebných délek a exportován ve formátu *.wav*. Záznam i export byl proveden při vzorkovacím kmitočtu 48 kHz a bitové hloubce 24 bit.

## 5.2 Měření nástroje

Výběr a zapůjčení nástrojů zprostředkovala firma Clarina Music [3]. Jedná se celkem o 6 nástrojů různých výrobců v širokém cenovém rozpětí. Všechny modely jsou B klarinety s francouzským typem mechaniky, liší se pak především v detailech vrtání, tloušťce stěn, materiálu klapky aj. Ačkoli jednotliví výrobci přirozeně neuvádějí technickou specifikaci kompletního provedení, lze uvést alespoň základní obecné rozdíly. Jednotlivé nástroje jsou v této i následující kapitole nadále seřazeny vždy podle cenové dostupnosti z doby měření (8.11.2018) od nejlevnějšího po nejdražší.

### **Buffet Crampon Prodige**

Jako jediný z vybraných nástrojů je tento klarinet zhotoven z umělé hmoty ABS, zároveň je však ve své kategorii považován za momentálně nejlepší na trhu. Jako umělohmotný nástroj vyniká svou odolností a stabilitou, přičemž je ze zvukového hlediska nezdárka srovnáván s celodřevěnými nástroji.

### **RZ Bohema Star**

Tento nástroj české značky je již vyráběn z grenadilu a od ostatních měřených nástrojů se liší svým „tlustostěnným“ konceptem. Dle subjektivního názoru majitele Clarina Music je jeho předností plnost, hloubka, barvitost a příjemnost v šalmajovém rejstříku, která může být kompenzována chudším projevem v rejstřících vyšších.

### **Yamaha YCL CSG III**

Podobně jako předešlý nástroj má také tlustostěnný koncept a dle [3] se celkově vyznačuje temnějším zabarvením a bohatou rezonancí. To je pravděpodobně zapříčiněno i mírně širším vrtáním, což by odpovídalo tvrzení na konci kap. 1.3.

### **RZ Capriccio**

Další zástupce značky RZ má zhruba podobné zvukové vlastnosti jako nástroj Bohema Star, nejedná se však již o tlustostěnný koncept a zatímco mechaniky ostatních nástrojů jsou zpravidla postříbřené, zde jsou sloupky upevňující klapky k tělu klarinetu pozlacené, což dle mnohých názorů zlepšuje přenos rezonancí ve dřevě. Narozdíl od Bohemy může mít teoreticky barevnější a bohatší zvuk i ve vyšších rejstřících.

### **Buffet Crampon Prestige**

Model Prestige firmy Buffet Crampon představuje dlouholetý světový standard mezi profesionálními hráči. Je využíván hojně v orchestrech i při sólovém hraní díky své bohatosti napříč všemi rejstříky. Často je tato vlastnost přisuzována především výběrovému dřevu.

### **Buffet Crampon Festival**

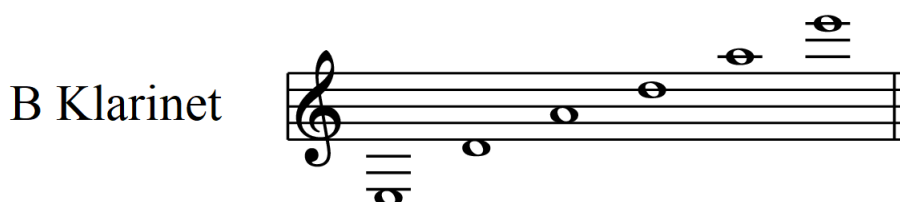
V porovnání s předešlým jmenovaným nástrojem je tento model oblíbenější při sólovém hraní. Oproti modelu Prestige má hustší dřevo a přefukovací klapka je umístěna nepatrně výše. Celkový dojem z nástroje se však v případě posledních dvou jmenovaných může různit v rámci několika jednotlivých kusů.

## 5.3 Naměřené vzorky

K záznamu bylo dále vybráno celkem šest tónů v různých rejstřících. Ačkoli se mezi hudebníky zpravidla označují podle hmatu, jsou v celé délce práce značeny podle výšky, v jaké ve skutečnosti zní. Tuto variantu volím především z technického hlediska, tedy aby konkrétní tóny odpovídaly svým reálným kmitočtům a nevznikaly nejasnosti při číselném srovnávání. Tón  $e$  pak v případě B klarinetu bude dále značen jako  $d$  apod.

Součástí práce jsou následující:

- Tón  $d$  byl vybrán jako nejnižší tón v šalmajovém rejstříku, přičemž všechny tónové otvory jsou uzavřené.
- Tón  $c_1$  představuje jistý „mezistupeň“ šalmajového rejstříku. Přefouknutím do druhého rezonančního módu nástroje při stejném hmatu je dán tón  $g_2$ , který je pro srovnání taktéž součástí měření.
- Tón  $g_1$  je druhý nejvyšší tón šalmajového rejstříku. Tónové otvory jsou otevřené.
- Tón  $c_2$  náleží rejstříku klarinového. Do měření byl zařazen jako „problematický“ tón z hlediska intonace.
- Tón  $g_2$  patří také do klarinového rejstříku, důvod jeho výběru je spjatý s tónem  $c_1$ .
- Tón  $d_3$  byl nakonec zvolen jako jeden z nejvýše položených běžně dosažitelných tónů i pro začínající hráče přefouknutím do třetího rezonančního módu nástroje.



Obr. 5.2: Notový zápis měřených tónů pro B klarinet.

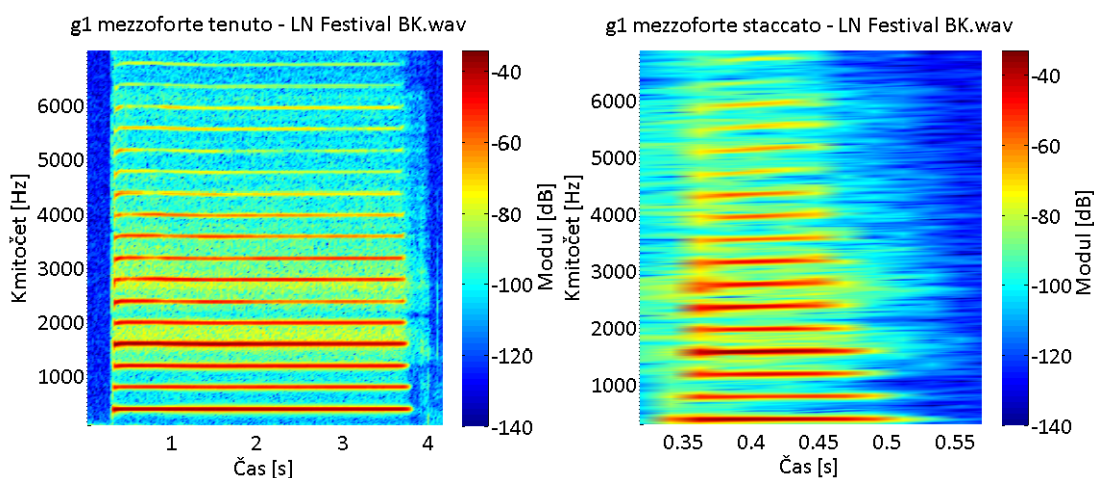
Všechny tóny byly oběma hráči několikrát zopakovány. Aby bylo možné analyzovat změny ve spektru v závislosti na dynamice hry, byly postupně naměřeny tóny v dynamice *piano*, tedy slabě, *mezzoforte*, středně silně a *forte*, silně. V každé dynamice byl hraný tón také zdvojen a odlišen stylem přednesu. Nejdříve byl zahrán *staccato*, krátce a po oddělení krátkou pauzou následovalo *tenuto*, dlouze. Tento vzorec byl postupně zopakován pro každý z výše uvedených nástrojů.

## 6 Vyhodnocení měření

### 6.1 Výběr vzorků a způsob vyhodnocování

Jak z výše uvedeného vyplývá, z měření vzešlo velké množství dat. Aby však výsledné výpočty měly co největší výpovědní hodnotu, je nezbytné upravit nebo vyloučit vzorky, které jsou přesprávně ovlivněné lidským faktorem. Ačkoli se tomuto vlivu nedá zcela vyhnout, lze jej několika kroky alespoň minimalizovat.

Jako první jsem se zabýval tím, zda-li má smysl vztahovat srovnávání jak k přednesu staccato, tak i tenuto, k čemuž mohou nejlépe sloužit spektrogramy, tedy zobrazení průběhu spektra v čase.



Obr. 6.1: Spektrogramy stejného tónu různé délky.

Z přiložených obrázků lze na první pohled vyvodit dvě základní informace. V průběhu nakmitávací fáze je s variabilním časovým předstihem v rámci různých tónů nejdříve slyšitelný fundament, přičemž u pravého spektrogramu s odstupem 30 ms dále nastupuje i druhá a postupně další vyšší harmonické složky. Jasně viditelná je i změna v kmitočtu, která je nejvíce patrná u složek s vyšším pořadovým číslem. Časový vývoj kmitočtové struktury byl však zřejmý v případě jiných tónů i u fundamentu a z několika pozorování se domnívám, že je průběh ve velké míře ovlivněn také nátiskem a technikou hry. Tento trend lze pozorovat u různých vzorků i při dokmitávací fázi, a proto jsem se nadále rozhodl do výsledků krátce hrané tóny nezahrnovat, především kvůli příliš krátké době trvání a velké odlišnosti, kterou nelze objektivně podložit. Jejich relevance by se pravděpodobně zvýšila při rozeznění nástroje umělými ústy, nicméně v případě takto provedeného měření by byly výsledky zatíženy citelnou odchylkou.

V případě dlouze hraných tónů jsem tyto poznatky také zahrnul v potaz a analýzu spektra vztahuji pouze k předem stanoveným úsekům tónu. Jako universální se mi jevilo odstranění prvních 300 ms tónu, přičemž spočtené číselné výsledky jsou vztaženy k následujícímu úseku, který trvá 1500 ms. V tomto čase jsou kmitočty i intenzity vyšších harmonických složek ustálené a lze objektivněji vnímat případné rozdíly. Je však přirozené, že hráč není schopen jeden tón několikrát po sobě identicky zopakovat a je možné jisté „vybočení“ některého vzorku z řady stejných tónů, což bývá zapříčiněno různou silou dechu či mírně odlišným nasazením rtů aj.

Vyhodnocování je dále seřazené dle jednotlivých tónů od nejnižšího po nejvyšší. Jako první je vždy uvedena komparační tabulka spekter, ve které jsou zahrnuty informace týkající se úrovně vyšších harmonických složek v porovnání s psychoakustickými veličinami a spektrálními příznaky. První polovina je vztažena k hráči Liborovi Novotnému, majiteli Clarina Music (dále jako hráč 1), druhá pak k Michalovi Křížovi, hráči Národního divadla Brno (dále jako hráč 2). Poté následují grafy LPC analýzy a diagramy směrových charakteristik. Zatímco u tabulek a LPC analýzy jsem se rozhodl kvůli nízké rozkolísanosti hlasitosti zvolit zobrazení dynamiky mezzoforte, u směrových charakteristik jsou vykresleny diagramy v dynamice forte, aby se v plné míře projevily směrové vlastnosti nástrojů. Doplňující soubory týkající se odlišných dynamik jsou dostupné v příloze na CD.

Nakonec bych chtěl zmínit, že v tabulkách jsou pro vyšší přehlednost úrovně vyšších harmonických složek vztaženy k úrovni fundamentu, který je symbolizován hodnotou 0. Z toho důvodu nelze tyto údaje absolutně srovnávat s moduly v grafech LPC analýzy, kde nejsou hodnoty takto normalizovány. Vyobrazení spektra v tomto případě slouží pouze k dokreslení celkového náhledu a identifikaci formantů.

## 6.2 Tón d

Tab. 6.1: Komparační tabulka spekter tónu d.

Nástroj	BC Prodigé	RZ Bohema	YCL CSG III	RZ Capriccio	BC Prestige	BC Festival
Hubička/Plátek	Vandoren B45 profil 88 / Peter Leuthner 3,0 Professional / LN					
Vzorek	d mezzoforte tenuto / 147 Hz					
Modul vyšších harmonických složek po odečtení modulu fundamentu [dB]						
$f_1$	0					
$f_2$	-37,29	-37,65	-44,22	-36,00	-38,91	-29,92
$f_3$	-5,85	-4,91	-2,71	-5,37	-2,16	-4,76
$f_4$	-26,10	-25,10	-23,24	-22,50	-20,94	-21,98
$f_5$	-14,38	-8,67	-9,72	-8,63	-7,47	-10,79
$f_6$	-27,32	-23,59	-23,13	-21,54	-17,71	-25,10
$f_7$	-19,29	-16,29	-16,12	-15,54	-14,90	-18,52
$f_8$	-20,34	-26,47	-19,37	-21,59	-13,62	-19,07
$f_9$	-28,42	-25,78	-22,99	-24,39	-18,31	-25,88
Hladina akustického tlaku, spektrální centroid, spektrální roll-off, jasnost, ostrost tónu a tonalita						
$L_p$ [dB SPL]	75,05	75,89	75,99	76,27	77,73	75,07
$SpC$ [Hz]	1110	1037	1145	1344	1420	1340
$SpRO$ [Hz]	3470	2953	3549	3821	3783	3574
$Jasnost$ [-]	4,48	4,08	5,08	5,07	6,44	4,57
$Ostrost$ [Acum]	0,55	0,59	0,64	0,74	0,79	0,70
$Tonalita$ [%]	84,56	85,40	86,94	84,45	79,32	84,52
Hubička/Plátek	Vandoren B40 Lyre / Esprit 3+ Professional / MK					
Modul vyšších harmonických složek po odečtení modulu fundamentu [dB]						
$f_1$	0					
$f_2$	-28,36	-26,84	-28,84	-31,54	-30,99	-27,35
$f_3$	-2,60	-3,18	-2,52	-3,33	-2,55	-2,67
$f_4$	-19,49	-19,47	-18,25	-21,66	-20,25	-17,97
$f_5$	-7,57	-2,45	-4,99	-6,50	-6,72	-3,72
$f_6$	-21,35	-14,45	-16,76	-22,40	-20,92	-17,18
$f_7$	-17,67	-12,37	-15,41	-17,87	-18,68	-14,46
$f_8$	-16,18	-27,02	-17,66	-18,09	-17,55	-15,06
$f_9$	-23,88	-17,94	-20,95	-24,20	-28,05	-22,63
Hladina akustického tlaku, spektrální centroid, spektrální roll-off, jasnost, ostrost tónu a tonalita						
$L_p$ [dB SPL]	78,70	80,38	79,16	78,52	78,55	80,08
$SpC$ [Hz]	1291	1082	1046	1001	1028	1090
$SpRO$ [Hz]	3247	2844	2931	3080	3091	3089
$Jasnost$ [-]	4,45	5,36	4,75	3,90	3,92	5,39
$Ostrost$ [Acum]	0,71	0,76	0,69	0,64	0,66	0,75
$Tonalita$ [%]	77,77	90,24	89,42	89,08	89,47	90,50

Spektrum nejnižšího měřeného tónu je pro klarinet tím nejtypičtějším. V případě obou hráčů jsou nejvíce dominantní první, třetí a pátá harmonická složka, které určují klasický dutý a nasální klarinetový tón. Zároveň je dle souborů v příloze možné vyčíst, že jejich úrovně jsou primárně definovány dynamikou hry. Při hře piano například ve spektru výrazněji figuroval pouze fundament a třetí harmonická,

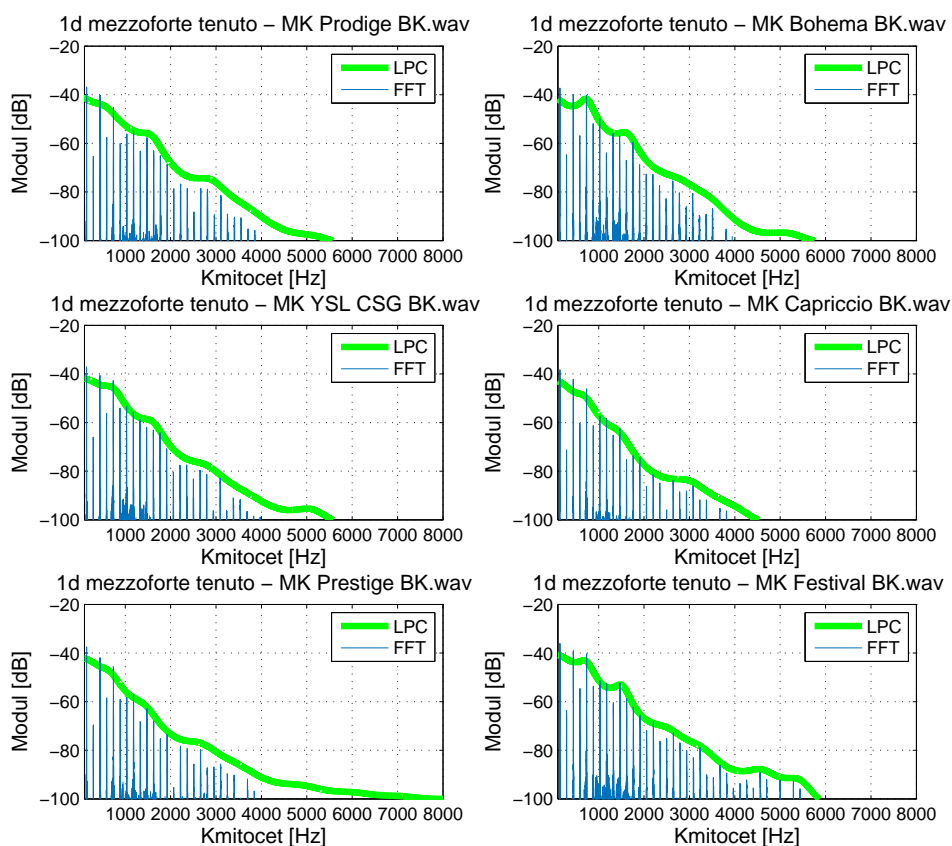
zatímco při hře forte jsou již více zastoupeny i sudé složky, přičemž pátá harmonická byla v některých případech i intenzivnější než základní kmitočet a citelněji vystoupily i sedmá či devátá harmonická složka, které tón nadále zostřují a stoupá jeho průraznost.

V obecné rovině lze také zmínit fakt, že v porovnání s výše položenými vzorky je možné tento tón popsat jako plný, tonální, tedy bez výrazné šumové složky či příliš intenzivních harmonických složek na vyšších kmitočtech, které by ubíraly na váze složkám v prvním pásmu, tj. takovým, které jsou vypsány v tabulce a určují z velké části charakter výsledné barvy. Na druhou stranu však harmonické ve vyšších pásmech svou přiměřenou intenzitou činí tón relativně jasným a ne příliš ostrým. Výraz „přiměřená intenzita“ zde volím zcela záměrně, neboť jak lze vypožorovat i z obr. 6.2, jsou harmonické složky v rozmezí 3 - 5 kHz, nejcitlivější oblasti lidského ucha, zastoupeny s odstupem 40 dB od úrovně fundamentu, což algoritmus pro výpočet ostrosti vyhodnotí jako méně ostrou barvu. Zároveň však vzhledem k velkému počtu těchto harmonických stoupá míra jasnosti, která je zde prakticky ze všech měřených tónů největší.

Co je po důkladnější analýze tabulky dále možné vyvodit, je rozdíl v barvě tónu obou hráčů. Ten může být způsoben jak technikou hry, tak i odlišným plátkem a hubičkou. Hráč 1 například volil plátek o něco měkčí než hráč 2, přičemž zároveň popsal svoji představu o barvě jako „plnou, s důrazem na průraznost i ve vyšších kmitočtech“, zatímco hráč 2 byl při popisu svého ideálu co se týče průraznosti o něco mírnější. Z uvedené tabulky není zcela jednoduché tato tvrzení potvrdit, v první řadě je však možné zaznamenat rozdíl v hlasitostech, která je v případě druhého hráče o 2 až 3 dB vyšší. Na základě tvrzení v kap. 1.3.1 by se dalo předpokládat, že se to projeví i ve vyšší jasnosti i ostrosti, což však v tomto případě platí pouze v rámci tónů hraných stejným hráčem. Navzdory vyšší hlasitosti je průměrná jasnost tónu druhého hráče o 0,32 jednotky menší a průměrná ostrost tónu o 0,03 acum větší než v případě prvního hráče. Rozdíl to není výrazný, je však pravděpodobné, že v případě srovnatelné hlasitosti by ostrost i jasnost druhého hráče byla zřetelněji menší. Je také vhodné dodat, že vzhledem k vyšší hlasitosti druhého hráče více vystoupila do popředí pátá harmonická složka a vnímaná tonalita je o zpravidla o 5 % než u hráče 1. To je pravděpodobně dáno větším důrazem na harmonické složky v prvním pásmu v porovnání se složkami ve vyšších pásmech, jak již bylo řečeno výše.

Co se týče rozdílnosti měřených nástrojů, je situace k vyhodnocení o něco složitější. Spočtené veličiny se v rámci různých dynamik i hráčů velmi liší a nelze jasně stanovit pravidlo či vzorec, dle kterého by bylo možné nástroje mezi sebou porovnat. To z velké části ovlivňuje také různá hlasitost jednotlivých vzorků či nátisk, neboť výsledné hodnoty ovlivňují i rozdíly v řádu desetin dB. Nabízí se alespoň možnost srovnání vzorků s nejvíce shodnou hlasitostí, i tak by však pro jednoznačné závěry

bylo nutné provést velké množství měření se srovnatelnou silou dechu a nátiskem, aby zprůměrované hodnoty měly dostačující výpovědní hodnotu. Pro příklad lze porovnat BC Prodiges s nástrojem BC Festival. V případě hráče 1 je jejich hlasitost prakticky totožná a dalo by se zprvu tvrdit, že BC Festival je jasnější i ostřejší, což se projevuje i v hodnotě spektrálního centroidu. Při pohledu na spodní polovinu tabulky tento fakt stále převládá, nicméně hlasitost je již o něco více odlišná a je otázka, zda by poměry zmíněných veličin zůstaly při srovnatelné hlasitosti stejné. Navíc při poslechovém testu zmíněných vzorků hráče 1 je dle mého subjektivního názoru patrný pravděpodobně rozdíl v nátisku, kdy působí vzorek nástroje BC Festival více „drnčivě“, což v případě hráče 2 neplatí. Jistou shodu v herní technice jsem znovu v subjektivní rovině zaznamenal při poslechu vzorků v dynamice forte. Dle tabulky pak dosahuje BC Prodiges i přes nižší hlasitost oproti ostatním vyšší jasnosti, ostrosti, ale nižší tonality. Teoreticky může tento poznatek tedy doložit fakt, že BC Prodiges, zhotovený z umělé hmoty ABS, nemá oproti ostatním nástrojům tak měkký a plný tón, čímž by se od výrazně dražších nástrojů odlišoval.



Obr. 6.2: LPC analýza tónu d.



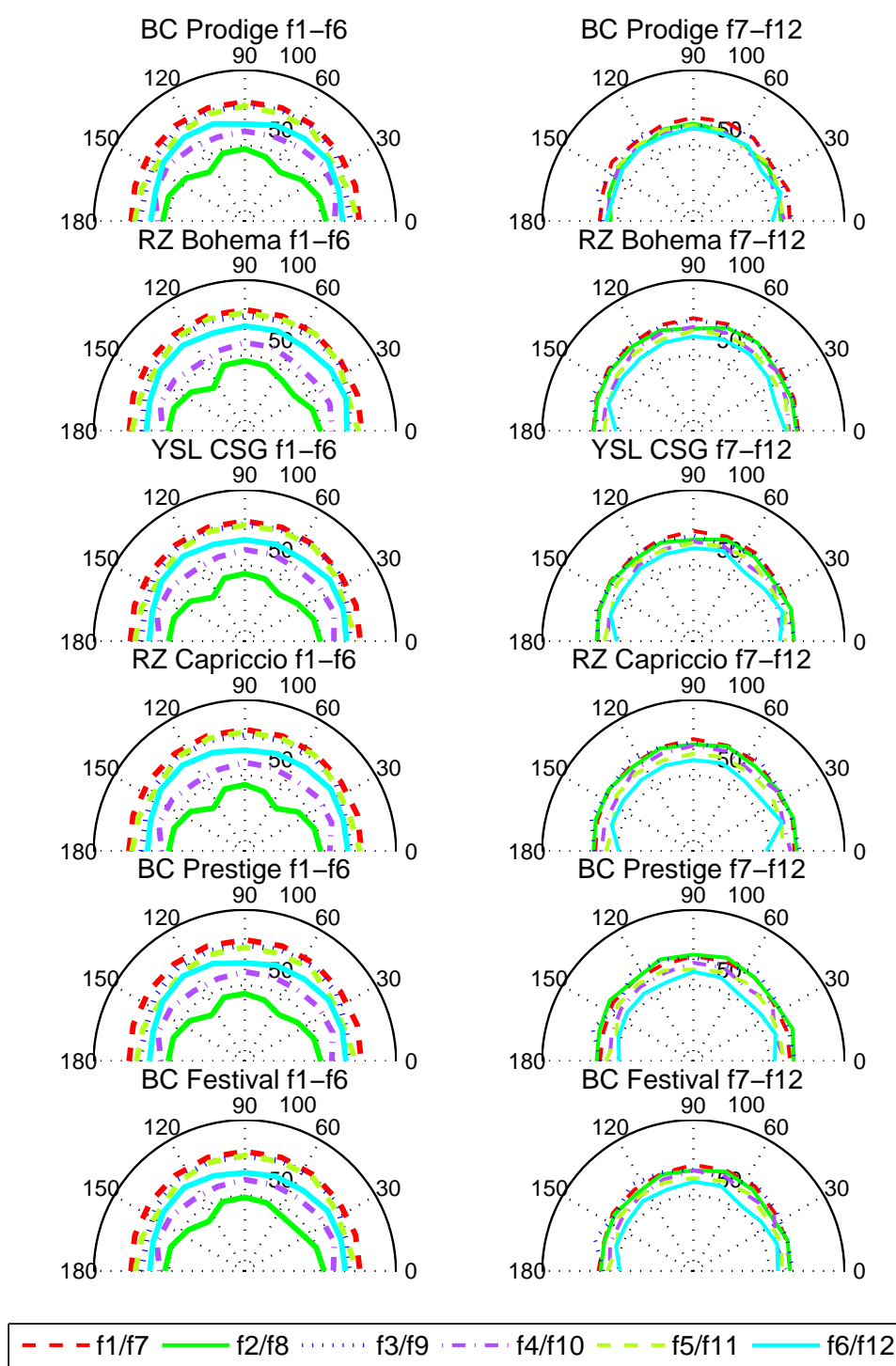
Obr. 6.2 dále nabízí možnost důkladnějšího výzkumu spektra hráče 2. Z hlediska formantové analýzy nelze prozatím s jistotou určovat jednotlivá formantová pásma, neboť skladba harmonických složek je relativně pravidelná a po páté harmonické rovnoměrně klesá. U vzorků s vyšší hlasitostí, jako je RZ Bohema a BC Festival, však lze již pozorovat formující se formantovou oblast v rozmezí kmitočtů 1,3 - 1,8 kHz, která spolu s intenzivnějšími složkami v oblasti 2 - 3 kHz způsobují vyšší hodnotu ostroty. Ačkoli se tato situace neopakuje v případě hráče 1, lze u něj podobně vyzorovat vznik formantových oblastí na podobných kmitočtech u dynamicky silnějších vzorků. Zajímavý je v jeho případě formant u vzorku nástroje BC Festival, který jsem dříve popsal jako nátiskově odlišný. Tento formant má velkou šířku se středním kmitočtem 2,85 kHz a výrazně odlišuje barvu od ostatních vzorků. Protože se tento fakt v jiných dynamikách nijak blízce neopákoval, jedná se doopravdy o odlišně zahráný tón, který v takové situaci nelze srovnávat s ostatními.

Co lze ještě u obr. 6.2 pozorovat, je intenzita složek nad hranicí 4 kHz. U dynamicky srovnatelných vzorků jako jsou RZ Bohema a BC Festival je možné stále vidět v případě nástroje Festival přítomnost složek nad touto hranicí, zatímco u nástroje Bohema nikoli. To by mohlo teoreticky odpovídat popisu nástrojů v kap. 5.2, přičemž se podobný vzorec opákoval i v případě hráče 1.

Doplňující údaje o charakteru nástrojů, které se však v mnohém shodují, pak zobrazuje obr. 6.3. Jak je uvedeno v literatuře [7], je klarinet převážně všesměrovým nástrojem. Protože jsou všechny tónové otvory při tomto tónu uzavřené, platí to zde více než u jiných, neboť prakticky všesměrové jsou i harmonické složky s pořadovým číslem 7 - 12. Jedinou zajímavostí je jistý směrový vzorec druhé složky, která je však ve všech případech stejná s výjimkou RZ Bohema a BC Festival, které i v dynamice forte mají mírně vyšší hlasitost.

## Shrnutí

Uvedené informace nejvíce vypovídají o obecné charakteristice nejnižšího tónu klarinetu v závislosti na hrané dynamice a odlišné barvě tónu obou hráčů. Prozatím v malé míře se potvrdilo tvrzení, že i mírně měkčí plátek pravděpodobně generuje jasnější a průraznější tón, což však může být dáno i technikou hry. Analýza spektra odlišných nástrojů však neprokázala zásadnější rozdíly. Z výše doloženého se lze například domnívat, že umělohmotný BC Prodiges může být o něco ostřejší a méně „plný“, to se však potvrdilo pouze při dynamice forte. Obecně i po zprůměrování veličin všech nástrojů ve všech dynamikách nelze najít zásadní rozdíly, které by se v případě obou hráčů podporovaly. Je tedy zřejmé, že v tomto případě byly rozdíly v barvě více tvořeny hráčem, než-li některým z uvedených nástrojů.



Obr. 6.3: Směrové charakteristiky tónu d.

## 6.3 Tón c1

Tab. 6.2: Komparační tabulka spekter tónu c1.

Nástroj	BC Prodigé	RZ Bohema	YCL CSG III	RZ Capriccio	BC Prestige	BC Festival
Hubička/Plátek	Vandoren B45 profil 88 / Peter Leuthner 3,0 Professional / LN					
Vzorek	c <sub>1</sub> mezzoforte tenuto / 262 Hz					
Modul vyšších harmonických složek po odečtení modulu fundamentu [dB]						
$f_1$	0					
$f_2$	-26,91	-24,65	-17,62	-20,33	-27,31	-23,25
$f_3$	-4,03	-2,85	-2,94	-1,65	-1,71	-1,27
$f_4$	-20,13	-20,80	-15,24	-18,00	-21,76	-18,78
$f_5$	-5,47	-4,92	-5,06	-1,12	-0,86	-5,69
$f_6$	-13,51	-19,95	-18,12	-11,89	-17,00	-8,79
$f_7$	-20,16	-30,48	-20,36	-14,50	-10,42	-3,56
$f_8$	-23,83	-24,76	-37,37	-20,31	-30,91	-9,68
$f_9$	-25,59	-25,91	-18,67	-22,19	-16,16	-21,76
Hladina akustického tlaku, spektrální centroid, spektrální roll-off, jasnost, ostrost tónu a tonalita						
$L_p$ [dB SPL]	75,99	75,35	74,88	75,79	77,59	75,86
$SpC$ [Hz]	2091	1770	1948	2147	2286	2289
$SpRO$ [Hz]	5561	4716	4899	5445	6865	6064
$Jasnost$ [-]	4,77	3,95	4,69	5,73	5,19	6,27
$Ostrost$ [Acum]	0,99	0,89	0,99	1,07	1,11	1,18
$Tonalita$ [%]	70,00	73,70	71,24	71,32	69,82	69,90
Hubička/Plátek	Vandoren B40 Lyre / Esprit 3+ Professional / MK					
Modul vyšších harmonických složek po odečtení modulu fundamentu [dB]						
$f_1$	0					
$f_2$	-28,44	-27,89	-27,46	-27,42	-24,80	-25,44
$f_3$	-0,14	-0,88	0,12	0,07	-0,23	-0,19
$f_4$	-21,78	-27,44	-22,27	-23,93	-20,48	-21,05
$f_5$	-2,69	-3,70	-2,97	-3,08	-2,79	-2,34
$f_6$	-17,78	-11,98	-13,27	-15,89	-11,48	-20,80
$f_7$	-17,02	-6,42	-21,84	-21,01	-22,39	-21,00
$f_8$	-18,80	-13,61	-26,31	-27,71	-22,27	-13,20
$f_9$	-19,71	-23,08	-20,68	-23,37	-18,00	-18,29
Hladina akustického tlaku, spektrální centroid, spektrální roll-off, jasnost, ostrost tónu a tonalita						
$L_p$ [dB SPL]	78,41	78,19	78,70	78,17	78,92	79,48
$SpC$ [Hz]	2000	2042	1847	1894	2006	1961
$SpRO$ [Hz]	7284	5298	5529	5889	6167	5537
$Jasnost$ [-]	4,70	4,83	4,48	3,57	4,84	4,62
$Ostrost$ [Acum]	0,95	1,12	0,93	0,92	1,01	1,01
$Tonalita$ [%]	70,76	70,63	72,99	70,97	70,69	71,18

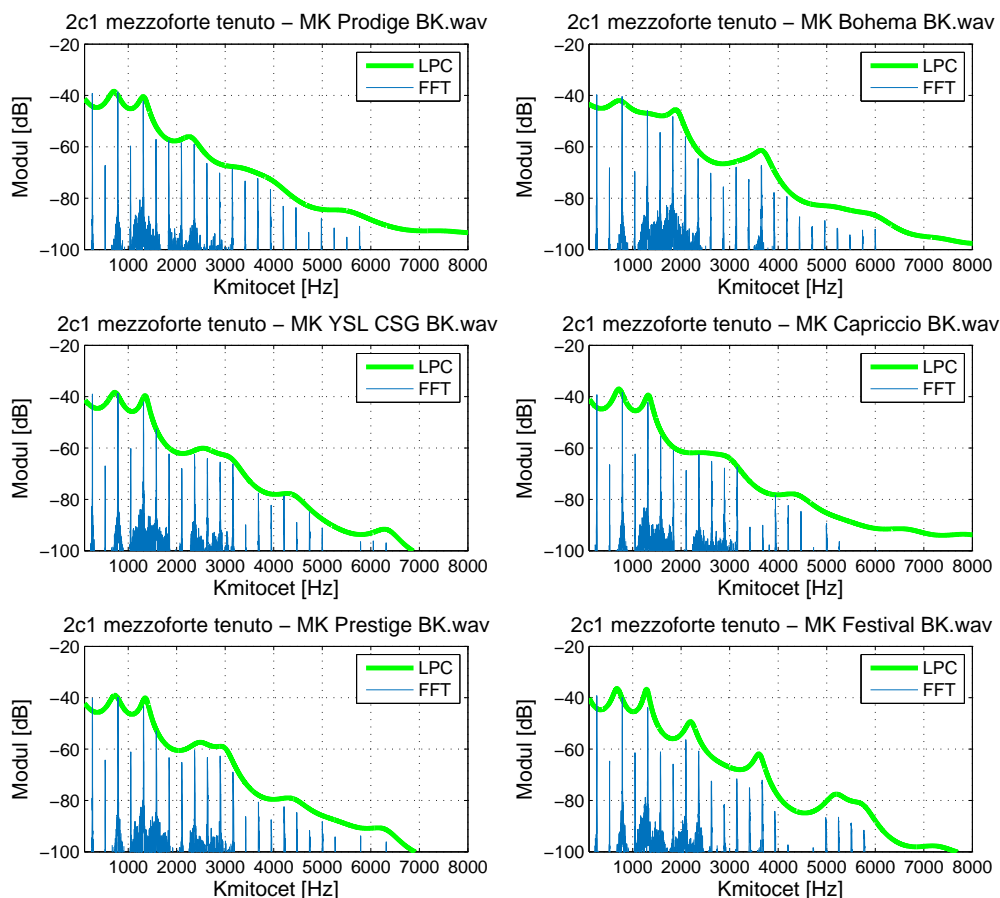
Další měřený tón náležící šalmajovému rejstříku je svou harmonickou skladbou velmi podobný tónu předešlému. Jeho charakteristická barva je znovu definována převládající třetí a pátou složkou, jejichž intenzita je v tomto případě i slabě vyšší. Co tento tón již více odlišuje, je například nárůst úrovně druhé složky, která je více patrná v případě hráče 1, kdy její úroveň v některých případech oproti předešlému tónu vzrostla o 15 - 20 dB. Důsledkem této změny může být například dle [23] vyšší

jasnost a pronikavost, přičemž je celkový charakter barvy stále zachován. Největší odlišnost lze pak sledovat v dynamice forte. Zatímco v dynamice piano se spektrum chová velice podobně jako u tónu d, při silnějším rozeznění nástroje začínají citelně vystupovat i sedmá a devátá harmonická, přičemž jejich odstup od sousedních sudých složek je výrazně větší než u tónu d.

Další změny vykazují i spektrální příznaky a tonalita. Ačkoli základní kmitočet tónu narostl pouze o 115 Hz, hodnota spektrálního centroidu se téměř zdvojnásobila a energetické těžiště spektra se nyní nachází v oblasti 2 kHz. Podobný nárůst je viditelný i u spektrálního roll-offu, který se dá dle tabulky teoreticky provázat s hodnotou tonality, resp. čím je šířka pásma efektivních harmonických složek větší, tím se tonalita snižuje. Takové tvrzení není zcela všeobecně aplikovatelné, závisí přirozeně i na konkrétních úrovních jednotlivých složek, jistou závislost však sledovat lze. Z grafů v obr. 6.4 dále vyplývá důvod zmíněného nárůstu hodnot spektrálních příznaků. Protože se navýšil základní kmitočet, je celkový počet harmonických složek o něco menší než u tónu d, na druhou stranu jsou však na vyšších kmitočtech intenzivnější. Tím pádem narůstá míra ostrosti, přičemž jasnost je zhruba stále stejná, což je právě důsledkem menšího počtu harmonických.

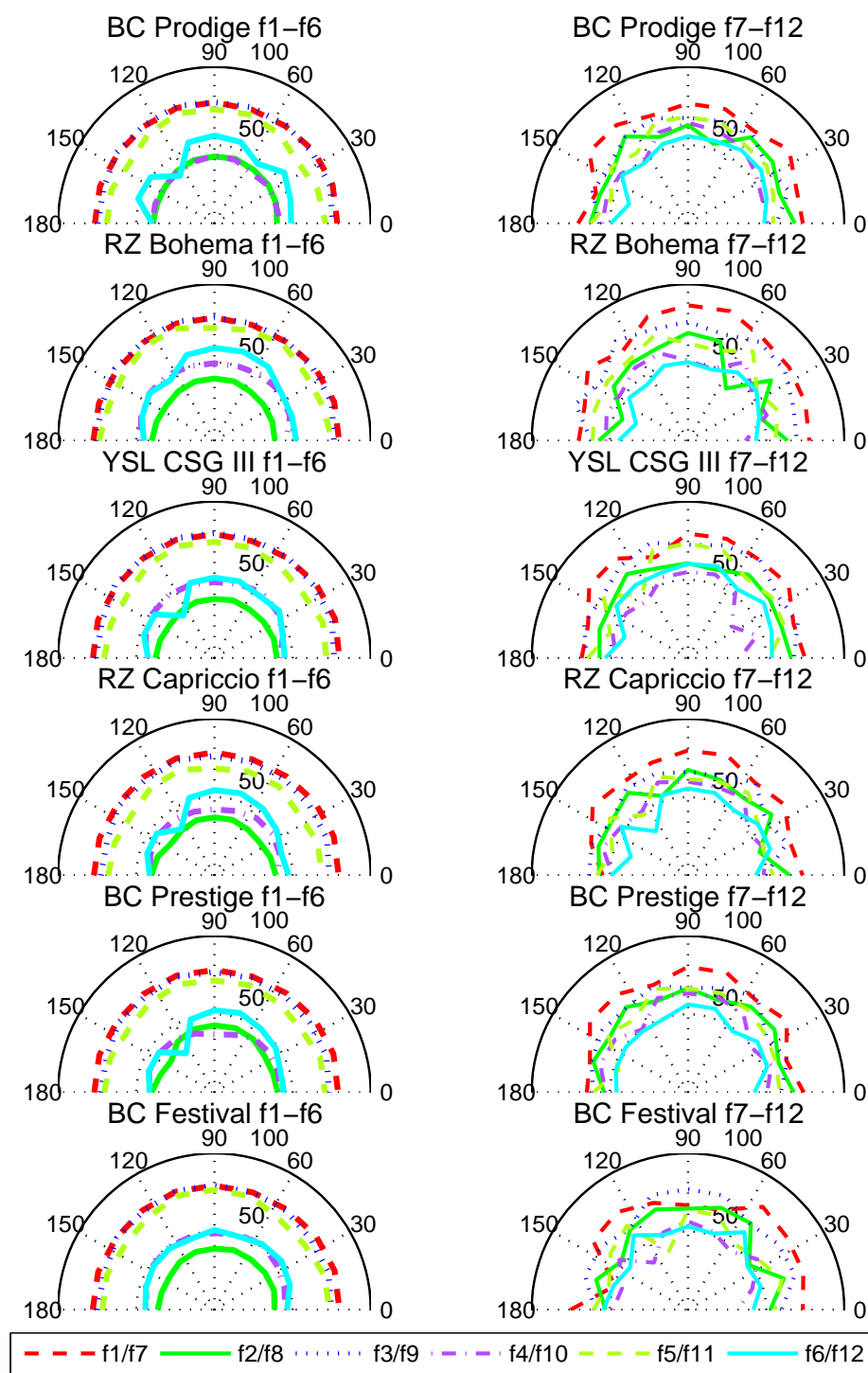
Kde naopak oproti předešlému tónu změna nenastává, je rozdíl v barvě obou hráčů. Navzdory stejným hlasitostním poměrům jako v předešlé kapitole tón hráče 1 ve všech dynamikách inklinoval k větším hodnotám jasnosti i ostrosti a například v dynamice forte je v jeho případě odstup druhé a čtvrté harmonické složky od fundamentu oproti hráči 2 zřetelněji menší. Tento rozdíl ve spektrálním složení je velmi zřetelný i při samém poslechu a pro přiblížení vlivu číselných hodnot jsou vybrané vzorky v původní délce také součástí přílohy.

Z nástrojů dále nejvíce dle provedeného měření dostal svému popisu v kap. 5.2 model YCL CSG III, který vykazoval napříč všemi dynamikami relativně nízkou hodnotu jasnosti i ostrosti, což může mít za důsledek rovněž vyšší míru tonality. V tabulce si lze také povšimnout pravděpodobně různých nátisků, které se nejvíce projevují v dynamice forte, kdy u některých tónů zcela chybí sedmá nebo osmá složka. Protože ale šlo o náhodné jevy, přisuzuji tento jev právě lidskému faktoru. V jiných případech se však znovu nevyskytuje pevné pravidlo, dle kterého by se spektrální skladba nástrojů opakovala a vyvození jakéhokoli závěru je spíše diskutabilní. Jako velmi podobné, což by odpovídalo jejich podstatě, se mi jeví kupříkladu BC Prestige a BC Festival, kdy přes vybočení vzorku nástroje Festival v dynamice mezzoforte vykazují shodu napříč všemi veličinami. Vzhledem k předešlé kapitole pak v porovnání s ostatními ani nemůžeme označit BC Prodigie jako více ostrý, jeho charakteristika se od ostatních zásadně nelišila a skladba harmonických složek v prvním pásmu je v jeho případě srovnatelná například s nástrojem RZ Capriccio.



Obr. 6.4: LPC analýza tónu c1.

Při LPC analýze se začínají více projevovat některé z charakteristických klarinetových formantů. Pominu-li první formant zapříčiněný intenzivní třetí harmonickou složkou, následuje další v okolí páté složky, který je typický i pro další vyšší tóny. Jeho kmitočet 1,2 - 1,3 kHz také odpovídá podkladům z literatury [7]. Formanty na vyšších kmitočtech jsou již velmi závislé na drobných dynamických výchylnkách a technice hry. Poměrně často se u všech nástrojů vyskytuje formant v oblasti 2,2 - 2,8 kHz, jehož šířka se ale u obou hráčů hodně různí. Pravděpodobně charakteristickým může být u modelu Festival formant na kmitočtu 3,6 kHz, který se opakoval i u druhého hráče, stejně tak méně intenzivní oblast v rozmezí 5 - 6 kHz, které mohou dodávat nástroji jistý typický jas či průraznost. Výraznější formant na kmitočtu 3,6 kHz měl i model RZ Bohéma, jehož druhý formant jako jediný vybočoval svou polohou z řady ostatních, to se však v případě druhého hráče neopakovalo.



Obr. 6.5: Směrové charakteristiky tónu c1.

Směrové charakteristiky jsou u tohoto tónu již více proměnlivé. U prvních šesti složek nelze znovu pozorovat výraznější směrové vzorce, ty se však více projevují u složek 7 - 12 a jsou relativně podpořeny stejným tvarem i v dynamice mezzoforte. Ačkoli jsou všechny vzorky zahrány stejným hmatem, například sedmá harmonická u BC Prodigie a BC Festival měla celkově širší dosah, na druhou stranu mírně kompenzovaný slabším vyzařováním čelem od hráče, který měl model RZ Bohema naopak nejvýraznější. Může se také zdát, že v tomto případě je sedmá složka v dynamice forte silnější než fundament, což však pouze způsobily problémy s vykreslováním polárních diagramů druhého sloupce a reálné hodnoty všech harmonických jsou o 10 dB menší. Z dalších vyšších harmonických, které jsou vzhledem ke své intenzitě relevantní, lze ještě sledovat složku osmou či devátou. Zatímco devátá složka působí stále všesměrově, u osmé je častým jistý propad v úhlu 30 či 60°, který se na druhou stranu v jiných případech neopakoval, takže může být teoreticky znovu závislý na technice hry či dynamických odchylkách.

## Shrnutí

V této podkapitole je popsán spektrální vývoj dalšího tónu šalmajového rejstříku v porovnání s tónem předešlým. Z tabulek vyplývá, že je charakterizován nárůstem prvních dvou sudých harmonických složek a při vyšší dynamice do popředí výrazně vystupují i sedmá či devátá složka, přičemž odstup sousedních sudých složek je naopak o něco větší. Z nástrojů se jako nejvíce temný či měkký projevil model YSL CSG III, zatímco domněnka z minulé podkapitoly, že BC Prodigie může působit o něco ostřeji, se zde nepotvrdila. Co se týče formantů, začala se u všech nástrojů výrazně projevoval oblast v rozmezí 1,2 - 1,4 kHz. Další typickou oblast může představovat úsek 2,2 - 2,8 kHz, jehož přesná poloha se však u různých vzorků stejných nástrojů různila. Naopak u modelu BC Festival se jako stabilní projevil formant na kmitočtu 3,6 kHz, který může nástroj takto charakteristickou jasností odlišovat od ostatních. U směrových charakteristik panovala obecně shoda, přičemž kromě méně intenzivních vyšších harmonických šlo sledovat mírné výkyvy například u sedmé nebo osmé harmonické složky. Nakonec šlo znovu pozorovat stejný trend v barvě obou hráčů, kdy veličiny jako ostrost nebo jasnost v případě hráče 1 vykazovaly o něco větší hodnoty. Jeho odlišná barva se také projevuje vyšší úrovní druhé a čtvrté harmonické, nejlépe pozorovatelné při dynamice forte. Jeho tón tedy nabýval jasnějšího a pronikavějšího charakteru.

## 6.4 Tón g1

Tab. 6.3: Komparační tabulka spekter tónu g1.

Nástroj	BC Prodigé	RZ Bohema	YCL CSG III	RZ Capriccio	BC Prestige	BC Festival
Hubička/Plátek	Vandoren B45 profil 88 / Peter Leuthner 3,0 Professional / LN					
Vzorek	g <sub>1</sub> mezzoforte tenuto / 392 Hz					
Modul vyšších harmonických složek po odečtení modulu fundamentu [dB]						
$f_1$	0					
$f_2$	-18,60	-16,37	-14,27	-13,08	-11,38	-11,38
$f_3$	-3,43	-12,28	-10,87	-11,84	-6,81	-9,10
$f_4$	1,21	-2,24	-0,46	0,68	-1,92	-2,30
$f_5$	-9,46	-14,15	-6,53	-14,95	-13,91	-14,26
$f_6$	-13,61	-15,12	-12,45	-16,09	-16,22	-18,46
$f_7$	-21,57	-22,45	-17,30	-14,04	-18,58	-13,52
$f_8$	-19,26	-34,96	-23,00	-22,19	-27,48	-21,67
$f_9$	-40,92	-29,29	-21,71	-21,43	-23,82	-24,04
Hladina akustického tlaku, spektrální centroid, spektrální roll-off, jasnost, ostrost tónu a tonalita						
$L_p$ [dB SPL]	75,83	74,22	74,54	73,94	73,52	73,44
$SpC$ [Hz]	2238	2426	2595	2559	2617	2765
$SpRO$ [Hz]	6351	8020	8853	7303	8232	8323
$Jasnost$ [-]	3,59	3,33	4,28	4,44	3,46	4,39
$Ostrost$ [Acum]	1,14	1,16	1,20	1,22	1,17	1,23
$Tonalita$ [%]	72,72	69,47	67,94	69,47	67,10	65,04
Hubička/Plátek	Vandoren B40 Lyre / Esprit 3+ Professional / MK					
Modul vyšších harmonických složek po odečtení modulu fundamentu [dB]						
$f_1$	0					
$f_2$	-18,32	-21,23	-20,64	-19,29	-18,53	-22,96
$f_3$	-6,60	-10,38	-7,91	-3,05	-3,30	-5,23
$f_4$	-4,74	1,46	-6,97	-5,16	-3,85	-6,93
$f_5$	-5,93	-12,20	-8,83	-5,85	-3,43	-4,68
$f_6$	-25,69	-20,41	-30,22	-36,60	-34,65	-29,82
$f_7$	-35,66	-16,81	-31,29	-36,24	-18,97	-29,64
$f_8$	-19,84	-28,08	-24,29	-18,90	-17,39	-18,16
$f_9$	-35,63	-39,48	-36,51	-32,31	-28,45	-35,41
Hladina akustického tlaku, spektrální centroid, spektrální roll-off, jasnost, ostrost tónu a tonalita						
$L_p$ [dB SPL]	75,04	77,86	73,44	76,58	76,40	75,76
$SpC$ [Hz]	2640	2331	2444	2370	2896	2586
$SpRO$ [Hz]	11924	6984	10227	8722	12980	11014
$Jasnost$ [-]	3,28	3,43	3,01	3,19	3,49	3,99
$Ostrost$ [Acum]	1,15	1,17	1,07	1,21	1,18	1,18
$Tonalita$ [%]	65,25	69,19	66,19	68,10	62,91	64,60

Druhý nejvyšší tón šalmajového rejstříku se prozatím nejvíce odlišuje od klasického klarinetového schématu, ve kterém výrazně převažují liché harmonické složky. Na první pohled lze v mnoha případech sledovat pro změnu dominanci čtvrté složky, přičemž úroveň sousední třetí a páté složky v porovnání s předešlými mírně klesá. Podobný scénář nastává i v dynamice piano, naopak v dynamice forte se do popředí



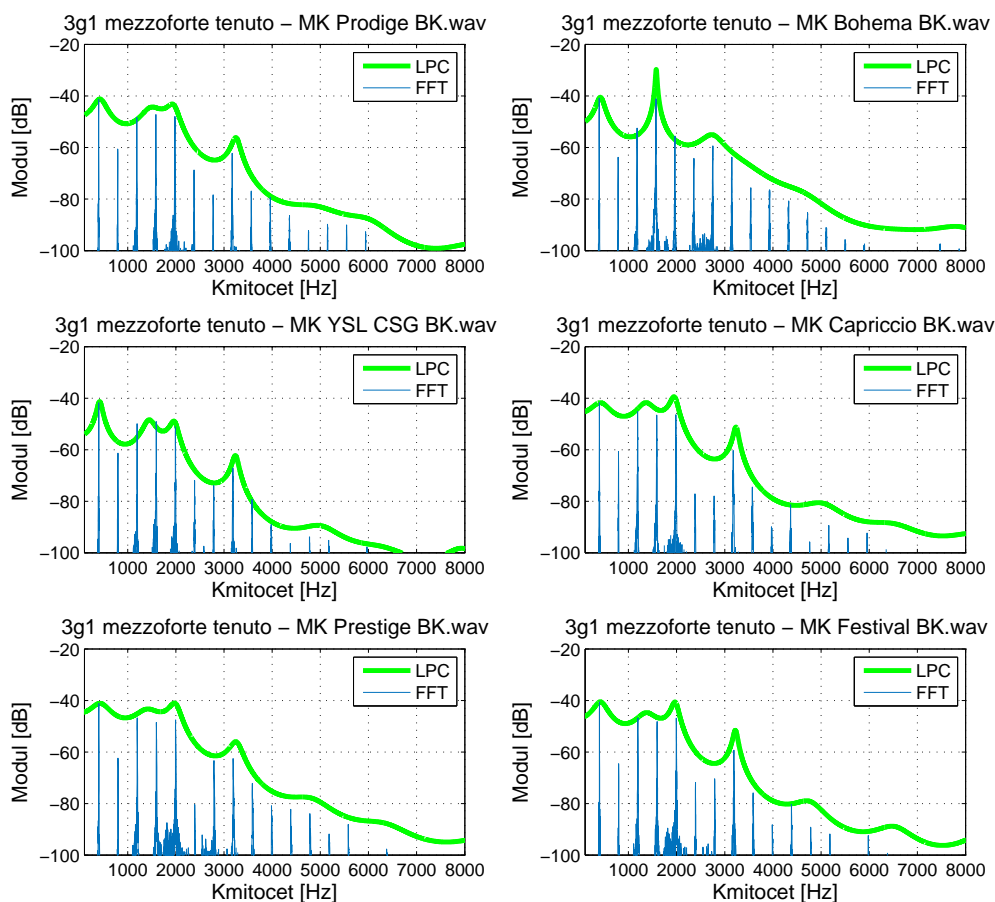
znovu vrací první dvě liché složky a odstup složky druhé se zvětšuje. Tón tedy získává celkově odlišný ténbr, vlivem čtvrté složky především pronikavější, pro příklad mírně podobný některým žestovým nástrojům.

Ačkoli může být tón pronikavější, dalším zajímavým poznatkem může být poměr veličin jako je ostrost a jasnost. Protože jasnost z velké části závisí i na celkovém počtu harmonických, lze v tomto případě sledovat její jistý pokles, neboť navzdory intenzitě je složek obecně méně. Čím víc se však spektrum posouvá na vyšší kmitočty, tím více narůstá ostrost tónu, která je již přibližně o 0,3 acum větší než u tónu nejnižšího. Výrazná oblast kolem čtvrté harmonické je pravděpodobně také příčinou snížené hodnoty tonality, která je prozatím z dosavadních nejnižší.

Rozdíl v barvě obou hráčů je dále patrný už prostým porovnáním uvedených úrovní složek v tab. 6.3. V případě hráče 1 je dominance čtvrté harmonické nejzřetelnější, zároveň následující složky s výjimkou třetí a páté nemají takový odstup od základního kmitočtu jako v případě hráče 2. Ačkoli je zásadní rozdíl v barvě dán právě uvedenými rozdíly mezi prvními pěti harmonickými složkami, stále také nadále platí, že zprůměrovaná jasnost napříč všemi vzorky hráče 1 je o 0,3 jednotky větší než u hráče 2 a ostrost je přibližně stejná, nepatrně menší. Sledovaný trend mezi oběma hráči se tedy dále drží přibližně na stejných číslech.

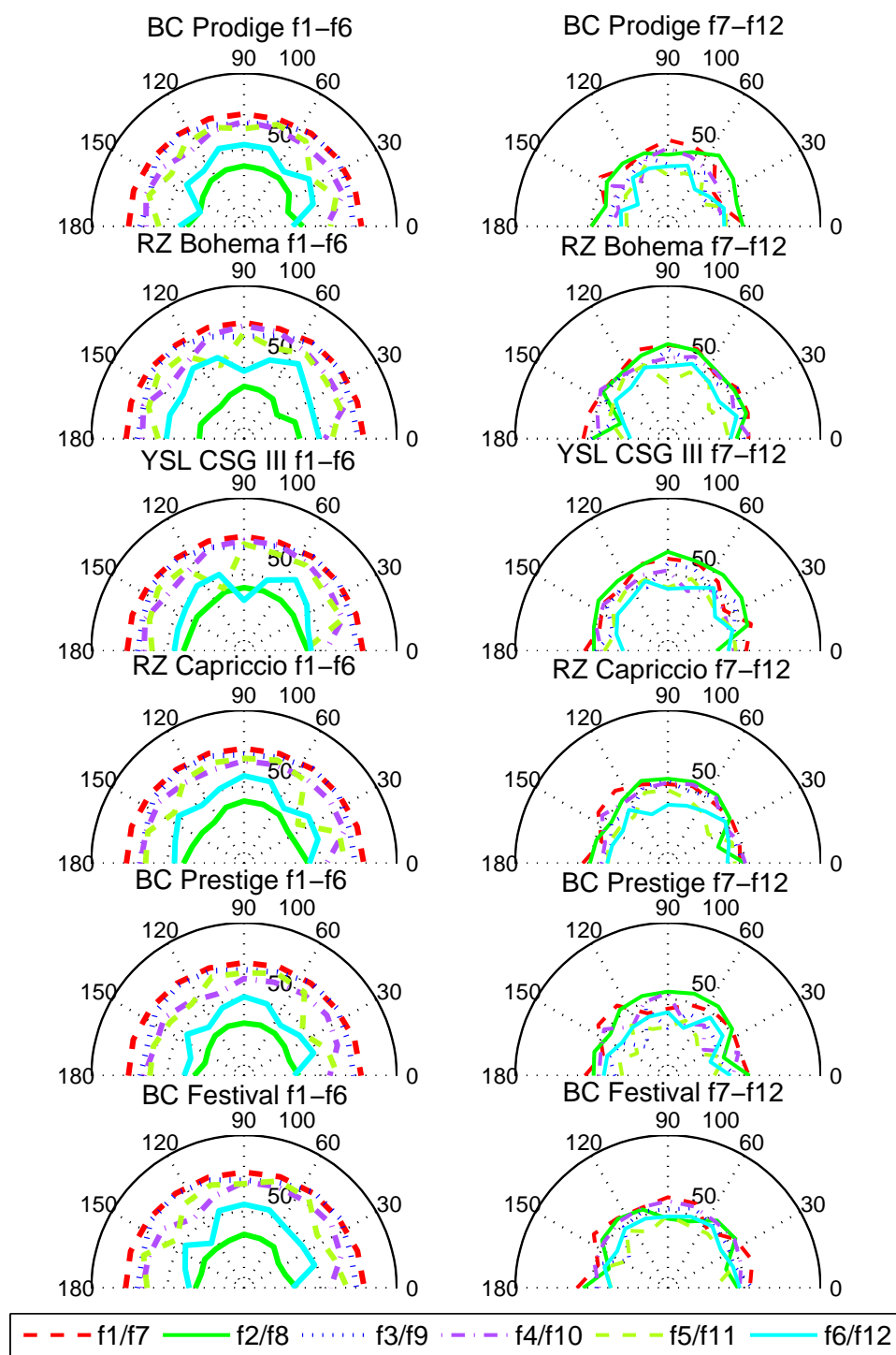
Při srovnávání nástrojů, vzhledem k doposud analyzovanému množství dat, lze pak začít vyvozovat více teorií. Spíše než-li určení, který z nástrojů nějakým způsobem vyčnívá, bych však prozatím své domněnky vztáhl k určitým dvojicím modelů. Například u cenově si podobných BC Festival a BC Prestige se začíná první uvedený vykreslovat jako o něco jasnější a ostřejší nástroj. Jeho hodnoty těchto veličin byly prozatím ve všech dynamikách doposud zmíněných tónů s výjimkou několika málo případů větší. Zajímavý je také fakt, že o několik cenových kategorií nižší BC Prodigie oproti modelům stejného výrobce žádné výrazné rozdíly zatím nevykazuje, nebo alespoň ne takové, které by šlo na základě porovnání vzorků mezi oběma hráči ve všech dynamikách považovat za relevantní. Po důkladnější analýze doposud vypsaných informací, ale i těch v příloze, je možné také vyvodit menší rozdíly co se týče nástrojů RZ Bohema a YCL CSG III, které se od ostatních nástrojů odlišují tlustšími stěnami svého těla. Po zprůměrování veličin většího množství vzorků může například model YCL CSG III teoreticky působit jasněji, ale méně ostře. Jak jsem však o něco výše uvedl, jedná se o rozdíly velmi malé, zároveň je v tabulkách viditelné, že oba nástroje se v rukou jednotlivých hráčů chovají poněkud odlišně. Model RZ Capriccio se pak v rámci tohoto tónu ve všech dynamikách velmi podobal nástrojům BC Festival a BC Prestige.

Formantů je dále již všeobecně méně a u většiny naměřených vzorků v rámci stejného hráče panuje shoda. Z uvedených grafů na obr. 6.6 lze vyčíst zejména tři hlavní formantové oblasti. První je přirozeně způsobena fundamentem, neboť vzá-



Obr. 6.6: LPC analýza tónu g1.

pětí následuje výrazný propad druhé harmonické složky. Další oblast se rozpíná od kmitočtu 1,2 kHz do 2 kHz. Šířka tohoto formantu je stejná pro všechny nástroje s výjimkou RZ Bohema, kde však dle poslechu lze zaznamenat citelnější rozdíl v interpretaci tónu, který se v jiných dynamikách ani při přednesu staccato neopakuje. Třetí formant se pak objevuje zpravidla u osmé harmonické složky na kmitočtu 3,1 kHz a pravděpodobně se velkou mírou také podílí na celkové odlišnosti barvy tónu, neboť se u předešlých tónů doposud neprojevoval. Při porovnání výše uvedeného grafu s LPC analýzou hráče 1 v příloze si lze také dodatečně prohlédnout, jak rozdíl v barvě hráčů narůstá. V případě hráče 1 totiž zmíněný třetí formant téměř úplně chybí, je však kompenzován vyšší intenzitou všech okolních složek, přičemž druhý formant má stejně úzký a intenzivní jako RZ Bohema v případě hráče 2. Při přirovnání formantových oblastí k těm, které se vyskytují u samohlásek, se celkově mění charakter tónu oproti předcházejícím z „u“ na „e“.



Obr. 6.7: Směrové charakteristiky tónu g1.

Jak se navyšuje základní kmitočet a jeho vyšší harmonické, lze sledovat u složek s vyšším pořadovým číslem užší vyzařování, což je očekávané. Vesměs je ale pro prvních pět složek nadále typická všesměrovost, přičemž se u modelu RZ Bohema a YCL CSG III vyskytuje výraznější propad čelně od hráče. To se však u druhého hráče nepotvrdilo, znovu tedy předpokládám, že tyto změny jsou spíše důsledkem odlišné interpretace tónu, kdy odpovídající složky „unikají“ jinými tónovými otvory. To může mít souvislost především s konkrétním hmatem tohoto tónu, kdy je valná většina otvorů otevřena. Domnívám se tedy, že z těchto diagramů nelze vyvodit nějaké charakteristické rysy, dle kterých by bylo například vhodné zvážit odlišné polohování mikrofonů či hráče.

## Shrnutí

Výše popsaný tón se jako první začíná více odlišovat od klasického klarinetového tónu. Poprvé bylo možné ve spektru sledovat dominanci jedné ze sudých složek, konkrétně čtvrté, která barvu od předchozích tónů patřičně odlišuje. Celkovou změnu povahy lze odvodit i od formantových oblastí, jejichž polohy při porovnání se samohláskami mění charakter tónu z „u“ na „e“. Barva obou hráčů byla nyní více odlišná než doposud, což je možné vyčíst jak ze skladby prvních devíti složek, tak i ze zprůměrovaných veličin ostrosti, jasnosti a tonality. Nadále tedy platí, že barva hráče 1 je zejména jasnější, patrně i mírněji ostřejší. Jako nejvíce shodné modely lze z uvedených získaných dat označit RZ Capriccio, BC Prestige a BC Festival, přičemž poslední jmenovaný prozatím vykazuje o něco jasnější a ostřejší charakter. U modelů jako jsou RZ Bohema a YCL CSG III, které se odlišují tlustostěnným konceptem, se pak lze domnívat, že druhý ze zmíněných je o něco jasnější, ale méně ostrý. Rozdíly to jsou avšak stále velmi malé a ani nejlevnější BC Prodiges se dle čísel v žádném aspektu nedá považovat za horší nebo nějak odlišný nástroj.

## 6.5 Tón c2

Tab. 6.4: Komparační tabulka spekter tónu c2.

Nástroj	BC Prodigé	RZ Bohema	YCL CSG III	RZ Capriccio	BC Prestige	BC Festival
Hubička/Plátek	Vandoren B45 profil 88 / Peter Leuthner 3,0 Professional / LN					
Vzorek	c <sub>2</sub> mezzoforte tenuto / 523 Hz					
Modul vyšších harmonických složek po odečtení modulu fundamentu [dB]						
$f_1$	0					
$f_2$	-19,94	-21,83	-12,94	-17,18	-15,92	-16,00
$f_3$	-8,41	-5,66	-4,74	-5,14	-9,10	-1,60
$f_4$	-23,73	-26,87	-36,15	-22,93	-24,13	-22,91
$f_5$	-30,32	-24,55	-29,28	-30,27	-33,01	-30,86
$f_6$	-26,32	-22,22	-23,31	-30,06	-27,47	-23,42
$f_7$	-46,14	-36,35	-36,67	-27,67	-36,69	-28,38
$f_8$	-40,15	-35,63	-35,67	-35,76	-36,71	-34,40
$f_9$	-44,05	-43,05	-39,89	-37,17	-40,48	-39,77
Hladina akustického tlaku, spektrální centroid, spektrální roll-off, jasnost, ostrost tónu a tonalita						
$L_p$ [dB SPL]	82,68	83,61	85,70	83,49	83,37	84,84
$SpC$ [Hz]	1788	1989	1820	1916	1876	1875
$SpRO$ [Hz]	4646	5079	4766	4795	4772	4748
$Jasnost$ [-]	2,00	2,30	2,76	2,12	2,35	2,85
$Ostrost$ [Acum]	1,15	1,22	1,23	1,27	1,20	1,26
$Tonalita$ [%]	83,59	80,95	85,18	83,77	82,67	85,29
Hubička/Plátek	Vandoren B40 Lyre / Esprit 3+ Professional / MK					
Modul vyšších harmonických složek po odečtení modulu fundamentu [dB]						
$f_1$	0					
$f_2$	-23,85	-26,38	-17,46	-21,31	-20,09	-22,35
$f_3$	-6,19	-6,31	-7,10	-5,89	-6,57	-2,83
$f_4$	-37,60	-30,26	-40,93	-38,92	-35,84	-30,22
$f_5$	-24,47	-24,67	-27,57	-26,56	-21,64	-21,89
$f_6$	-25,84	-25,14	-26,41	-24,97	-26,35	-20,81
$f_7$	-32,32	-31,11	-37,84	-33,71	-32,42	-29,09
$f_8$	-50,83	-40,20	-46,21	-47,87	-44,43	-38,56
$f_9$	-49,54	-54,99	-65,16	-53,99	-57,19	-47,18
Hladina akustického tlaku, spektrální centroid, spektrální roll-off, jasnost, ostrost tónu a tonalita						
$L_p$ [dB SPL]	85,06	86,34	86,16	87,03	87,33	88,75
$SpC$ [Hz]	2204	2327	1857	1878	2317	2035
$SpRO$ [Hz]	8969	8112	4496	4855	9288	5312
$Jasnost$ [-]	1,95	2,44	2,24	2,10	2,08	2,48
$Ostrost$ [Acum]	1,17	1,25	1,18	1,22	1,21	1,27
$Tonalita$ [%]	73,13	71,15	78,88	78,71	73,01	77,83

K dosažení dalšího tónu je již zapotřebí otevřené přefukovací klapky, čímž se rejstřík zároveň mění ze šalmajového na klarinový. Většina tónových otvorů je při hraném hmatu oproti minulému uzavřená a při tvorbě tónu vzniká spektrum podobnější nižším tónům šalmajového rejstříku s tím rozdílem, že základní kmitočet je dán druhým rezonančním módem trubice a z lichých složek už dominuje pouze třetí. Zajímavá je situace v dynamice piano, kdy úroveň třetí harmonické patrněji klesá

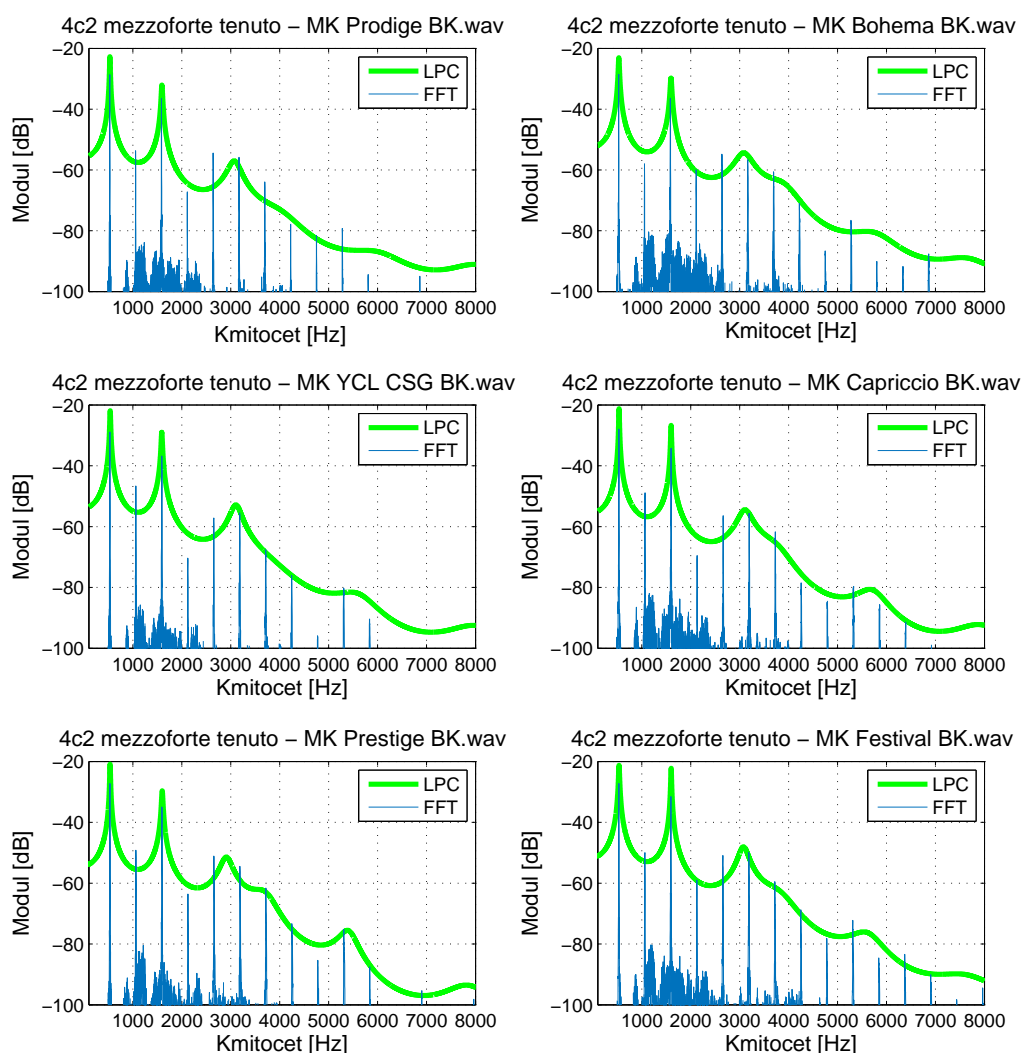
a má srovnatelnou úroveň s druhou harmonickou, přičemž následující složky mají od fundamentu odstup až 40 dB. Při dynamice forte se třetí složka naopak znovu dostává do popředí a lze sledovat obecný nárůst všech následujících složek s tím, že v některých případech jsou ještě mírně výraznější i složka pátá či sedmá. Nástroj tedy při tomto tónu znovu nabývá o něco více svého klasického charakteru.

K obecným charakteristikám lze dále doplnit, že s výše položeným základním kmitočtem dále ubývá vyšších harmonických, jasnost tónu se snižuje a ostrost se naopak mírně zvyšuje, protože velká část spektra již náleží oblasti, na kterou je lidské ucho nejvíce citlivé. Tím, jak je spektrum „řidší“ a bez rozsáhlejších lokálních extrémů, se také zvyšuje hodnota tonality, neboť fundament výrazně převažuje nad ostatními složkami či formanty. To lze podložit i hodnotami spektrálních příznaků; ačkoli se doposud postupně navyšovaly, nyní přišel výraznější propad, který u spektrálního centroidu činí až 800 Hz, celkové těžiště spektra je tedy blíže fundamentu než u předchozích dvou tónů.

Rozdíl v barvě hráčů není nyní tak markantní, ale jisté odlišnosti lze stále najít. Například úroveň druhé a třetí harmonické je relativně podobná, výraznější změna pak nastává u čtvrté složky, která je u prvního hráče intenzivnější. Obecně lze tvrdit, že sudé harmonické hráče 1 mají nižší odstup od sousedních lichých složek a ačkoli nejsou rozdíly tak patrné jako u tónu  $g_1$ , celkově se podílejí na tvorbě odlišného charakteru. Zásadnější rozdíly nelze najít ani mezi psychoakustickými veličinami, přičemž ostrost je u obou hráčů zhruba stejná, liší se pouze mírně jasnost, která je znovu větší u hráče 1.

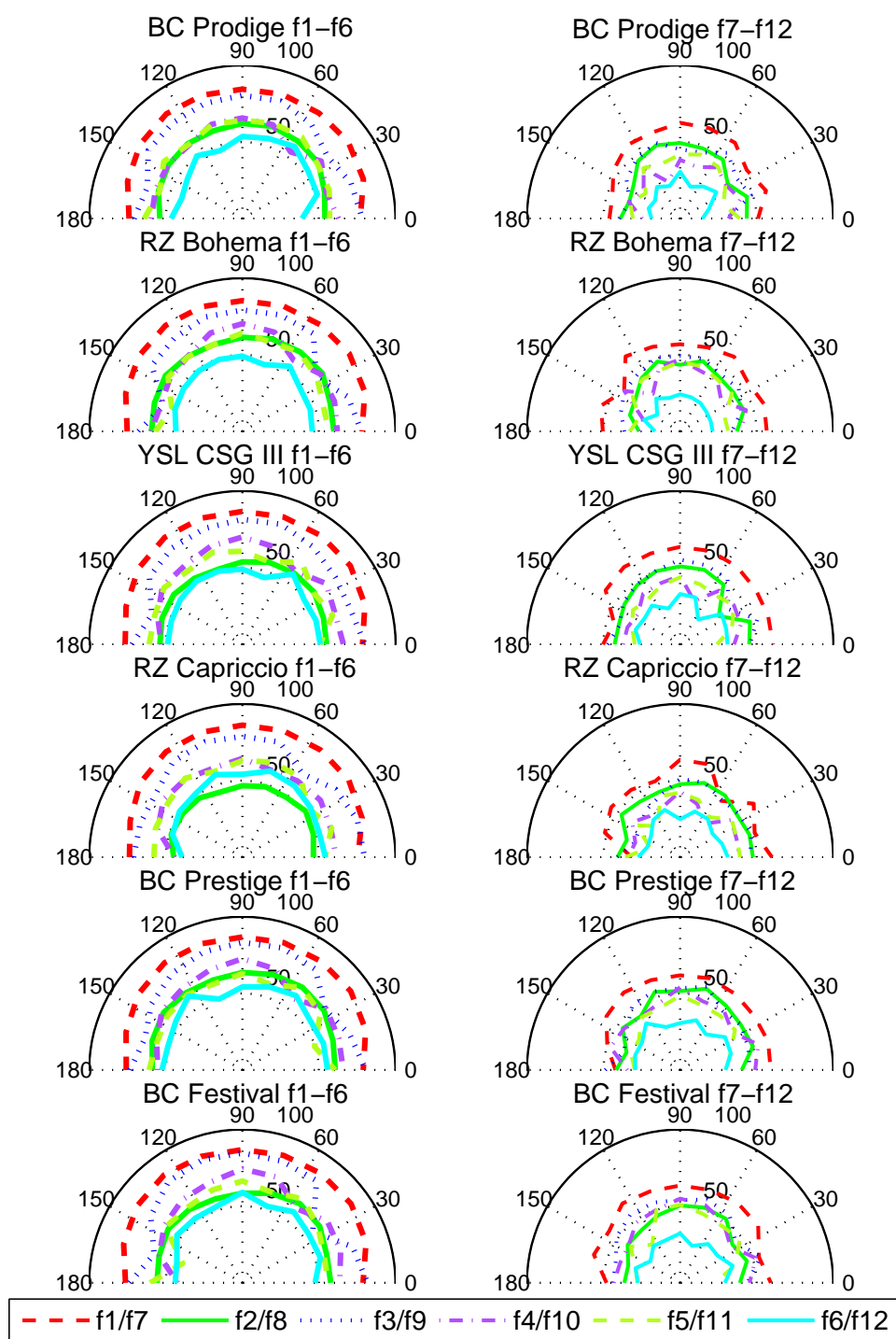
Pokud bych měl držet podobný model srovnávání nástrojů jako v minulé podkapitole, znovu se mi jeví například z dvojice BC Prestige a BC Festival jasnější i ostřejší druhý uvedený, zároveň je zajímavé, že navzdory jeho vyšší hlasitosti má celkově nižší polohu spektrálního těžiště a také větší hodnotu tonality. Jasnost je mimo svou číselnou hodnotu u BC Festival podpořena také výraznější přítomností sudých harmonických v prvním pásmu. Této dvojici se znovu ve velké míře podobá i RZ Capriccio, v podstatě však u žádného z nástrojů nelze sledovat výraznější odlišnosti. Struktura prvního pásma harmonických u modelu BC Prestige je například v případě hráče 2 téměř totožná i s modelem BC Prodiges, otázkou však zůstává, zda-li by tomu tak bylo i při srovnatelných hlasitostech.

U LPC analýzy je dále možné identifikovat podobně jako minule zpravidla tři formantové oblasti. První odpovídající základnímu kmitočtu tónu, další na kmitočtu 1,5 kHz, dodávající tónu typickou dutost, a pak třetí v rozmezí kmitočtů 2,9 - 3,2 kHz, který barvě mírně přidává nasalitu a jasnost. V některých případech se vyskytuje i čtvrtý formant v okolí kmitočtu 4,7 kHz, ten se ale napříč dynamikami liší, může se tedy pravděpodobně jednat o záležitost nátisku.



Obr. 6.8: LPC analýza tónu c2.

Při analýze směrových charakteristik je patrné, že se vlivem zavření velké většiny tónových otvorů harmonické obecně znovu chovají všesměrově. Jediné rozdíly je možné sledovat v pravém sloupci, kdy je například směrovost složek u nástrojů BC Prestige a BC Festival více „vyrovnaná“ a nelze pozorovat výraznější propady či charakteristické laloky. Jisté vybočení některých tvarů však znovu bohužel není možné podložit daty získanými u dalšího hráče. Podobně jako ve spektru se ale nástroje chovají při podání tohoto tónu velice podobně.



Obr. 6.9: Směrové charakteristiky tónu c2.



## Shrnutí

První měřený tón z klarinového rejstříku se svou spektrální strukturou znovu podobá nižším tónům z rejstříku šalmajového a výrazná třetí harmonická složka vrací barvě oproti předešlému tónu typickou dutost. U psychoakustických veličin lze také zaznamenat, že se s narůstajícím základním kmitočtem srovnává poměr jasnosti a ostrosti, resp. tón již působí především ostře vlivem polohy nejintenzivnějších harmonických v nejcitlivější oblasti lidského ucha. Na základě množství analyzovaných vzorků je možné také s větší jistotou tvrdit, že rozdíl v barvě hráče 1 od hráče 2 tvoří především nižší odstup sudých složek od okolních lichých, ale stále také mírný rozdíl ve veličině jasnosti, přičemž ostrost je přibližně srovnatelná. V případě LPC analýzy již charakteristika spíše kopíruje jednotlivé nejintenzivnější složky a celkově je u všech nástrojů velmi podobná, což platí i v případě charakteristik směrových. Výraznější rozdíly mezi jednotlivými nástroji u tohoto tónu tedy hledat nelze, ale například dříve „temnější“ YCL CSG III naopak nyní působí spíše jasněji. Je také zajímavé, že v jeho případě byla ze všech případů nejsilnější druhá harmonická a naopak nejslabší harmonická čtvrtá. Z dvojice BC Prestige a BC Festival pak podobně jako minule působil jasněji a ostřeji model Festival, zatímco BC Prodigé měl například u hráče 2 téměř totožnou spektrální strukturu jako BC Prestige.

## 6.6 Tón g2

Tab. 6.5: Komparační tabulka spekter tónu g2.

Nástroj	BC Prodigé	RZ Bohema	YCL CSG III	RZ Capriccio	BC Prestige	BC Festival
Hubička/Plátek	Vandoren B45 profil 88 / Peter Leuthner 3,0 Professional / LN					
Vzorek	g <sub>2</sub> mezzoforte tenuto / 784 Hz					
Modul vyšších harmonických složek po odečtení modulu fundamentu [dB]						
$f_1$	0					
$f_2$	-5,64	-8,32	-9,68	-2,95	-2,69	-1,64
$f_3$	-17,14	-15,97	-11,75	-11,59	-9,99	-10,60
$f_4$	-17,04	-17,01	-13,77	-30,71	-17,72	-16,94
$f_5$	-38,55	-40,92	-43,67	-28,32	-32,67	-26,09
$f_6$	-47,25	-57,07	-31,69	-35,39	-30,62	-31,52
$f_7$	-49,20	-44,34	-43,05	-42,17	-50,60	-49,27
$f_8$	-60,94	-55,85	-53,37	-55,03	-59,19	-54,39
$f_9$	-69,86	-77,36	-55,50	-59,46	-51,29	-49,09
Hladina akustického tlaku, spektrální centroid, spektrální roll-off, jasnost, ostrost tónu a tonalita						
$L_p$ [dB SPL]	81,08	82,31	82,39	81,99	83,99	83,63
$SpC$ [Hz]	2133	2165	2544	2269	2219	2392
$SpRO$ [Hz]	4647	5490	6388	5532	4750	5826
$Jasnost$ [-]	1,78	2,00	2,20	1,88	2,02	2,09
$Ostrost$ [Acum]	1,40	1,42	1,47	1,38	1,42	1,43
$Tonalita$ [%]	81,06	80,23	75,25	75,82	80,11	75,66
Hubička/Plátek	Vandoren B40 Lyre / Esprit 3+ Professional / MK					
Modul vyšších harmonických složek po odečtení modulu fundamentu [dB]						
$f_1$	0					
$f_2$	-9,27	-8,38	-3,21	-15,00	-15,43	-10,07
$f_3$	-12,09	-13,02	-15,19	-15,85	-27,89	-12,34
$f_4$	-40,86	-24,30	-15,34	-20,36	-15,92	-19,73
$f_5$	-26,44	-30,29	-37,43	-25,92	-43,34	-24,09
$f_6$	-53,89	-48,36	-36,40	-53,06	-52,80	-57,17
$f_7$	-44,42	-49,35	-44,02	-47,77	-47,05	-44,37
$f_8$	-47,12	-53,44	-59,28	-66,98	-52,44	-54,73
$f_9$	-51,44	-71,33	-70,06	-71,28	-54,56	-54,49
Hladina akustického tlaku, spektrální centroid, spektrální roll-off, jasnost, ostrost tónu a tonalita						
$L_p$ [dB SPL]	86,75	85,27	84,61	85,71	86,08	85,35
$SpC$ [Hz]	2646	2605	2205	2642	2582	2481
$SpRO$ [Hz]	11671	11823	5533	10072	9961	8235
$Jasnost$ [-]	1,73	1,90	2,27	1,74	1,85	1,93
$Ostrost$ [Acum]	1,41	1,36	1,37	1,47	1,42	1,43
$Tonalita$ [%]	72,48	72,52	78,74	72,51	74,42	76,29

Další tón už více odpovídá teoretickému popisu klarinového rejstříku, resp. nejvýraznější složkou je hned druhá harmonická, u třetí se odstup od základního kmitočtu navyšuje, přičemž zřetelně se na barvě podílí také čtvrtá a v některých případech i pátá složka. V dynamice forte se k jmenovaným přidávají také šestá či sedmá harmonická a naopak v dynamice piano figurují ve spektru výrazněji pouze druhá a třetí harmonická. Jak tedy z názvu rejstříku vypovídá, charakter zvuku se začíná

větší měrou přibližovat historickému nástroji klarina, jehož spektrum se více podobalo například trumpetě. Celkově se jedná o průraznější a „řezavější“ charakter, na druhou stranu stále relativně měkký vlivem absence vyšších harmonických v druhém či třetím pásmu.

Dále je stále pozorovatelný trend, kdy jasnost tónů klesá a narůstá ostrost, což je vzhledem k intenzitě prvních čtyř harmonických v rozmezí kmitočtů 0,78 - 3,1 kHz logické. Záměrně již také neuvádím grafy LPC analýzy, neboť spektrum prakticky do přibližně páté složky téměř rovnoměrně klesá, následuje výraznější propad a charakteristické formantové oblasti už není možné identifikovat.

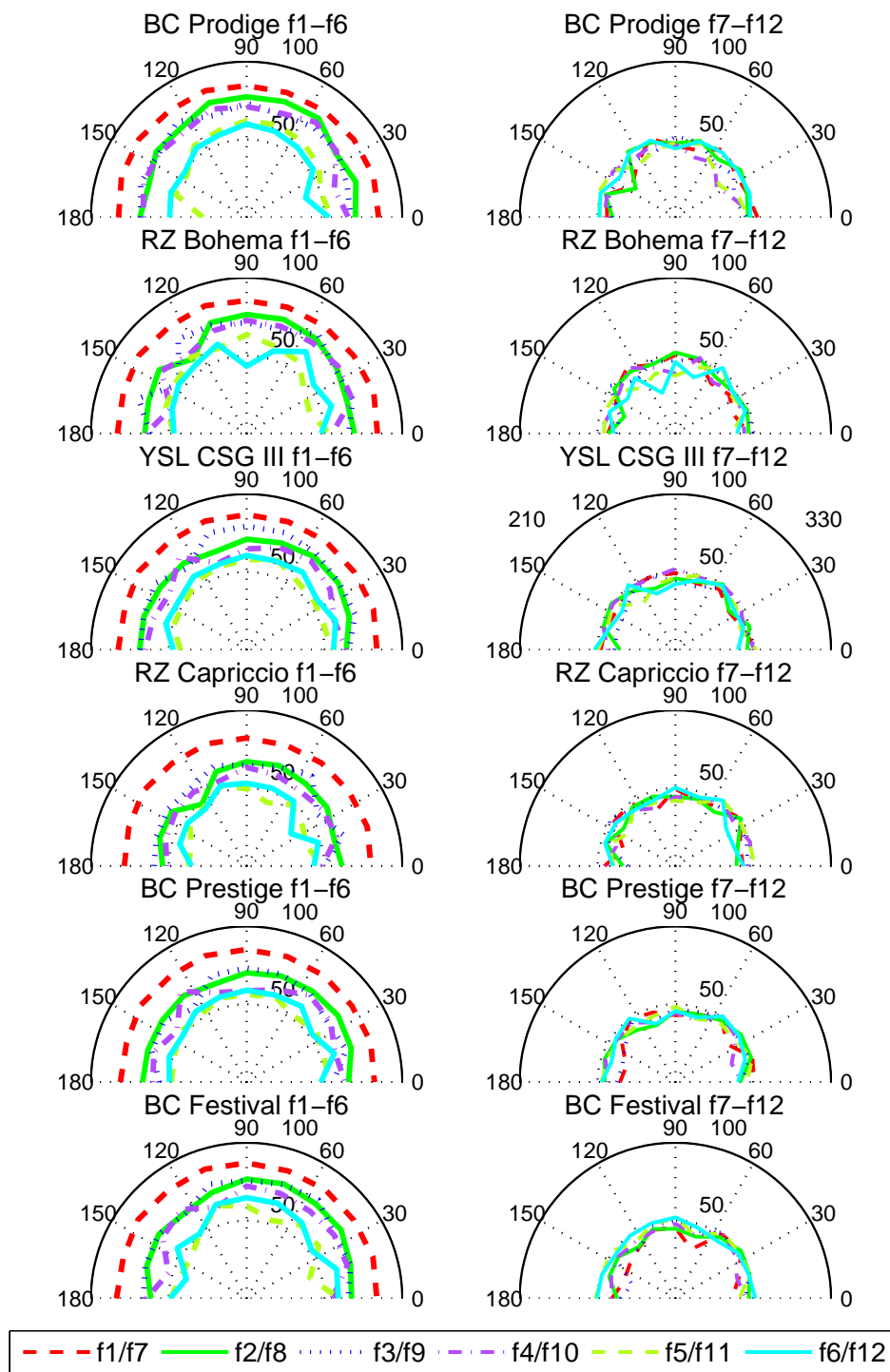
Jako v případě dřívějších úvah se také znovu potvrzuje fakt, že u hráče 1 jsou ve spektru více přítomné sudé složky. Důsledkem toho je opět vyšší míra jasnosti, na druhou stranu ostrost je již u obou hráčů přibližně stejná. Nelze však zapomenout na otázku, jestli by takto uvedený popis byl stále přesný i při srovnatelných hlasitostech.

U nástrojů, bohužel jako v mnoha předchozích situacích, nelze vyvozovat silněji podložené závěry. Co pravděpodobně doopravdy platí je, že barva modelu BC Festival je o něco jasnější či průraznější než u nástroje BC Prestige. Odlišnější témbro může způsobovat také ve všech dynamikách silnější druhá harmonická. Naopak model BC Prodiges se tentokrát vykresluje jako měkký, což si však protiřečí s údaji v dynamice forte, kde je pak spíše jedním z ostřejších. Co se dále na základě popisu v kap. 5.2 stále nepotvrdilo, je menší „bohatost“ spektra modelu RZ Bohema ve vyšších polohách, stejně tak jako naopak větší barvitost modelu RZ Capriccio. Rozdíly jsou pravděpodobně menší, než rozdíl způsobený lidským faktorem při provedeném měření.

U směrových charakteristik pak v podstatě také nastává stejný scénář jako u všech předchozích tónů. Prvních šest složek zůstává nadále téměř všesměrovými a případné výkyvy se u dalšího hráče nebo v jiné dynamice opětovně nevyskytují, z velké části tedy zřejmě závisí na preciznosti tónové interpretace.

## Shrnutí

Další měřený tón z klarinového rejstříku je svou barvou prozatím nejodlišnější. Spektrum už nelze popsat jako liché, v dynamice forte v případě hráče 1 dokonce převážovaly úrovně druhé a čtvrté složky nad ostatními, což také znovu potvrzuje úvahu, že odlišnost barvy hráče 1 tkví zejména v silnější přítomnosti sudých harmonických. Z dvojice nástrojů BC Prestige a BC Festival byl dále znovu jasnější a dá se říct že i pronikavější model Festival. Naopak z kap. 5.2 se doposud nepotvrdila možná „chudost“ modelu RZ Bohema ve vyšší poloze, stejně jako naopak větší barvitost modelu RZ Capriccio. U směrových charakteristik pak nebyly zaznamenány charakteristické rozdíly, které by byly podloženy daty z jiných dynamik či druhého hráče.



Obr. 6.10: Směrové charakteristiky tónu g2.

## 6.7 Tón d3

Tab. 6.6: Komparační tabulka spekter tónu d3.

Nástroj	BC Prodigé	RZ Bohema	YCL CSG III	RZ Capriccio	BC Prestige	BC Festival
Hubička/Plátek	Vandoren B45 profil 88 / Peter Leuthner 3,0 Professional / LN					
Vzorek	d <sub>3</sub> mezzoforte tenuto / 1175 Hz					
Modul vyšších harmonických složek po odečtení modulu fundamentu [dB]						
$f_1$	0					
$f_2$	-8,90	-12,90	-8,40	-9,78	-14,44	-8,09
$f_3$	-15,35	-16,81	-12,27	-10,65	-13,34	-15,70
$f_4$	-46,67	-37,20	-29,79	-26,82	-36,23	-29,23
$f_5$	-46,22	-40,46	-43,14	-42,40	-40,43	-40,67
$f_6$	-48,88	-59,05	-55,31	-51,14	-60,48	-52,77
$f_7$	-63,77	-54,05	-53,73	-63,01	-66,58	-61,30
$f_8$	-61,67	-56,28	-58,82	-62,35	-71,55	-56,38
$f_9$	-59,07	-66,65	-61,72	-63,29	-66,05	-69,64
Hladina akustického tlaku, spektrální centroid, spektrální roll-off, jasnost, ostrost tónu a tonalita						
$L_p$ [dB SPL]	85,15	89,85	87,52	85,55	87,45	90,31
$SpC$ [Hz]	2904	2646	3013	2844	2775	2685
$SpRO$ [Hz]	10870	6125	8350	4994	5958	7129
$Jasnost$ [-]	1,73	1,59	1,56	1,47	1,46	1,35
$Ostrost$ [Acum]	1,51	1,48	1,60	1,63	1,61	1,48
$Tonalita$ [%]	84,86	89,20	85,10	87,36	82,21	83,25
Hubička/Plátek	Vandoren B40 Lyre / Esprit 3+ Professional / MK					
Modul vyšších harmonických složek po odečtení modulu fundamentu [dB]						
$f_1$	0					
$f_2$	-17,93	-10,81	-9,51	-11,96	-10,62	-15,81
$f_3$	-21,86	-31,62	-26,87	-27,29	-43,71	-24,61
$f_4$	-36,89	-31,70	-44,75	-48,41	-36,39	-41,77
$f_5$	-47,10	-53,46	-37,46	-45,22	-44,25	-55,72
$f_6$	-54,69	-57,07	-69,98	-59,46	-50,88	-57,12
$f_7$	-65,49	-68,63	-67,82	-60,05	-70,87	-69,25
$f_8$	-70,66	-62,33	-68,82	-64,41	-72,60	-76,45
$f_9$	-70,99	-73,82	-68,88	-64,81	-67,58	-73,75
Hladina akustického tlaku, spektrální centroid, spektrální roll-off, jasnost, ostrost tónu a tonalita						
$L_p$ [dB SPL]	92,25	95,43	92,99	94,59	94,64	94,42
$SpC$ [Hz]	2361	2328	2196	2129	2057	2117
$SpRO$ [Hz]	5905	5407	5907	4280	4775	4770
$Jasnost$ [-]	1,44	1,64	1,50	1,27	1,26	1,49
$Ostrost$ [Acum]	1,38	1,41	1,44	1,35	1,37	1,33
$Tonalita$ [%]	84,47	84,90	90,78	90,71	90,22	90,87

Spektrum posledního z měřených tónů je velmi podobné předešlému, přičemž je čím dál víc řidší. V dynamice piano například odstup druhé složky od fundamentu přesahuje hodnotu 20 dB a charakter je velmi podobný flétně. Při dynamice forte se pak z dalších složek citelněji zapojují i čtvrtá, mírněji také pátá a tón je již velmi ostrý. Pravděpodobně vzhledem k větší obtížnosti hraného tónu je viditelná také větší rozkolísanost dynamiky, což stěžuje jakékoli srovnávání.

Z tabulky lze dále vyčíst, že fundament leží na kmitočtu 1175 Hz a jeho faktická úroveň velkou měrou ovlivňuje celkově vnímanou ostrost, která je v dynamice forte například o 1 acum větší, než u nejnižšího klarinetového tónu. Teoretický vjem jasnosti je pak logicky ze všech měřených vzorků nejmenší a naopak tonalita, vlivem převažujícího fundamentu, dosahuje velmi vysokých hodnot.

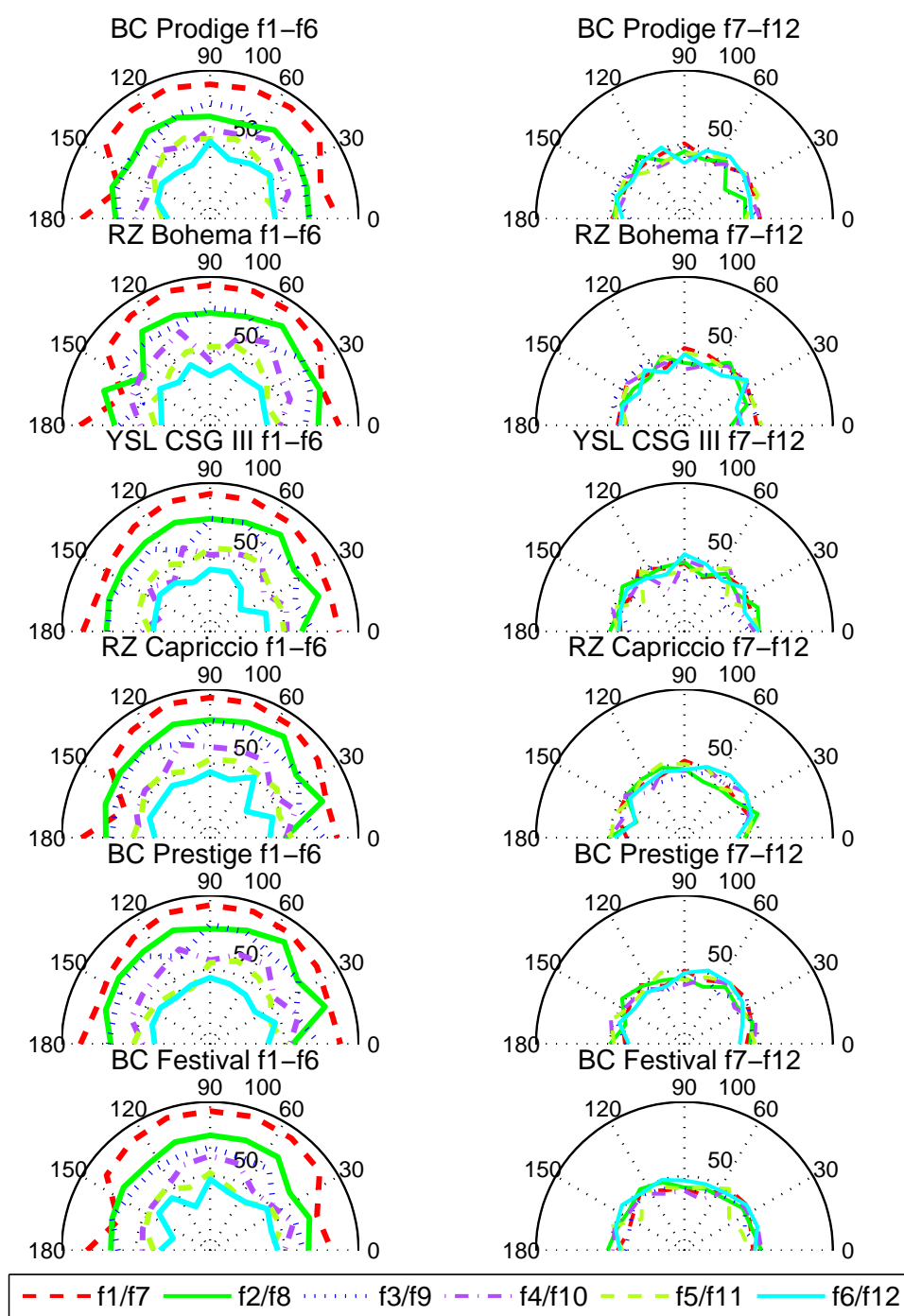
Relativně novou zajímavostí co se týče barvy hráčů je pro změnu úplně jiný poměr sudých a lichých složek. Zatímco u hráče 1 je druhá harmonická doplněna o něco méně intenzivnější třetí harmonickou, u hráče 2 má třetí složka výrazně menší roli. Z úrovní hladin akustického tlaku si lze vyvodit, že v případě hráče 2 je základní kmitočet ještě o něco silnější a celkově tak může mít tón „pevnější“ a měkčí charakter, což je především pozorovatelné v dynamice forte.

Z probírané dvojice BC Prestige a BC Festival tentokrát větší ostrosti nebo jasnosti napříč dynamikami dosahoval model Prestige a teoreticky se dá uvažovat nad tím, zda-li nemá ve vyšší poloze nástroj Festival naopak temnější či měkčí charakter, k tomu by však bylo zapotřebí proměření většího množství tónů. Zajímavá je pak situace u nástroje BC Prodigé, kdy se v dynamice mezzoforte charakterem od dalších modelů stejného výrobce výrazně neodlišuje, ale znovu dosahuje především větší ostrosti v dynamice forte, což může vzhledem k četnosti tohoto faktu o něco více vypovídat o chování tohoto nástroje. U dalších modelů je zobecnění složitější, neboť mezi veličinami nelze najít žádnou spojitost v jiných dynamikách nebo u dalšího hráče.

Další komplikaci při srovnávání spekter přináší i vyobrazení grafu směrových charakteristik, kde je chování prvních šesti harmonických již více odlišné a s výjimkou prvních dvou složek jsou u dalších patrné výkyvy, které znovu přiřazují hlavně podání tónu, neboť se u obou hráčů velmi liší. Mezi nejvýraznější se řadí například propad čtvrté a šesté složky čelně od hráče v případě modelu RZ Bohema, což však není poprvé. Podobný vzorec směrovosti jedné či více sudých složek tohoto nástroje je možné pozorovat i u některých z předešlých tónů.

## Shrnutí

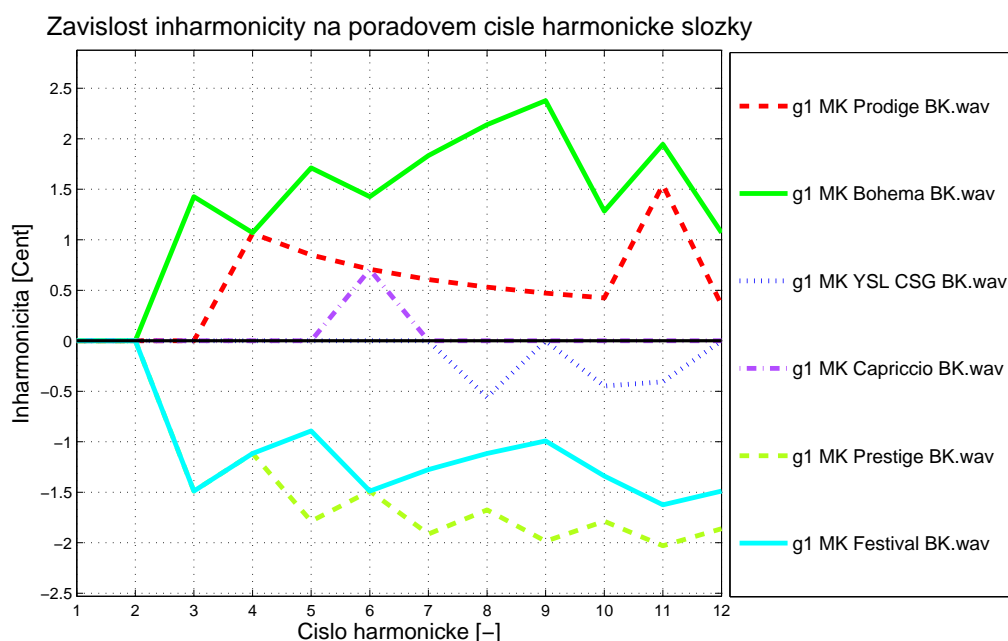
Poslední měřený tón se strukturou svého spektra a témbrem podobá jiným nástrojům, jako může být flétna. Na tvorbě barvy se například u hráče 2 výrazněji podílel pouze fundament a druhá harmonická, mírněji pak harmonická třetí. Tím se také znovu odlišoval charakter tónu hráče 1, v jehož spektru třetí složka figurovala o poznání více a míra ostrosti jeho tónu byla o poznání vyšší. Z dvojice nástrojů Prestige a Festival se tentokrát ukázal jako ostřejší první, u modelu Prodigé pak lze již po několikáté sledovat větší ostrost a jasnost v dynamice forte, což by mohlo více vypovídat o tom, jak se tento nástroj chová.



Obr. 6.11: Směrové charakteristiky tónu d3.

## 6.8 Rekapitulace výsledků a diskuze

V předchozích kapitolách byly projednány naměřené vzorky jednotlivých tónů včetně dílčích obecných shrnutí. Než uvedu celkovou rekapitulaci výsledků, rád bych se také krátce dotkl tématu inharmonicity, které jsem nakonec mezi hlavní prvky srovnávání nezahrnul, znovu především kvůli relativně malým hodnotám, a také nemožnosti vyvodit jakýkoli závěr (viz. dále). Jakých hodnot inharmonicity u měřených nástrojů dosahuje, uvádí pro příklad alespoň následující obrázek.



Obr. 6.12: Inharmonicity tónu g1.

Největší odchylky se pohybují zpravidla kolem 3 centů, přičemž jsou výsledky přirozeně ovlivněny drobnými změnami nátisku aj. Zajímavostí je po analýze většího množství vzorků pravděpodobně o něco menší míra inharmonicity nástroje BC Prodigé, což by mohlo být dáno i právě umělohmotnou strukturou, která může být i přes přibližně půlhodinovou aklimatizaci nástrojů před měřením více odolná vůči vnějším vlivům. U ostatních modelů se však inharmonicity napříč tóny velmi lišila a jakékoli zobecnění není možné.

Co dále z měření vyplynulo celkově nejvíce, je rozdíl v barvě tónů měřených hráčů. Ačkoli jejich plátky mají srovnatelnou tloušťku, rozdíly byly místy velké, což může být také dáno odlišnou herní technikou. Tónové specifikace se pak prakticky odvíjely i od popisu plátků jejich výrobcem. Na stránkách českého výrobce ESPRIT je například pro výslednou barvu uveden popis jako „temný“ či „kompaktní“, tedy charakter více typický pro hráče 2 než hráče 1, který naopak používal nepatrně měkčí



plátek rakouského výrobce Petera Leuthnera. Zmíněná temnost se pak vyznačovala menší jasností či ostrostit, v případě některých tónů také nižšími úrovněmi sudých harmonických složek v prvním pásmu, nebo celkově větším odstupem vyšších harmonických od základního kmitočtu, který byl v případě hráče 2 výraznější a tón tak mohl působit více „plně“ či „široce“, jak je uvedeno v Helmholtzově teorii slyšení v kap. 2.1. Nesnažím se však naznačit, že je některá z barev lepší, záleží samozřejmě na vkusu a žánrových potřebách hudebníka, případně prostoru, ve kterém je skladba interpretována. Pro hráče 1 byly pak často typické vyšší úrovně druhé či čtvrté harmonické, které klasický dutý klarinetový tón o něco více „projasnily“. V jeho tónu bylo možné sledovat i celkově větší množství harmonických s vyšší intenzitou.

Co se týče nástrojů, bylo obtížné na základě získaných hodnot přiřazovat jakékoli charakteristické vlastnosti hned z několika důvodů. Mezi ty patří již několikrát zmíněné odlišnosti v dynamice, drobné změny v nátisku či další faktory, které se na barvě při tvorbě tónu hráčem podílejí. Mimo jiné jsem také zaznamenal komplikaci při samém držení tónu, kdy se spektrální struktura v nezanedbatelné míře časem mění a ačkoli jsem se snažil výsledky vztáhnout k stejným časovým úsekům každého vzorku, je přirozené, že tento průběh není pro každý z nich totožný. Vzhledem k výše uvedeným jsem se proto snažil získané veličiny z dostupných vzorků stejného tónu alespoň zprůměrovat (viz. tabulky v příloze, nebo tab. 6.7), aby se více prokázal některý z charakteristických rysů, nicméně objektivnost je stále diskutabilní a data jsou spíše informativní. Spolu s dalšími poznatky pak odvozené domněnky týkající se barvy shrnuji takto:

- **BC Prodigé** - Přes možná očekávání, že barva tohoto modelu bude nějakým způsobem oproti několikanásobně dražším nástrojům vybočovat, se zásadní odlišnosti v charakteru neprojeví. V několika případech například dosahoval mírně větší ostrosti či jasnosti v dynamice forte, ale při zprůměrování harmonických složek prvního pásma z více dynamických úrovní měl shodnou spektrální strukturu jako BC Prestige nebo Festival. Jako možnou odlišnost bych však uvedl často vyšší hodnotu naměřené hladiny akustického tlaku v dynamice piano a naopak menší v dynamice forte. Teoreticky může mít nástroj užší dynamický rozsah, především v šalmajovém rejstříku.
- **RZ Bohema a RZ Capriccio** - Pro dvojici těchto nástrojů byl předpoklad, že se budou lišit spíše ve vyšších rejstřících. Zajímavostí je, že se u nižších tónů tyto nástroje v rukou měřených hráčů chovají prakticky „opačně“ co se týče například hodnot ostrosti nebo jasnosti a spektrálního centroidu, jednoznačný závěr tedy nelze vyvodit. Po zprůměrování dosahoval u nižších tónů větší ostrosti model Bohema, naopak těžiště spektra měl výše položený model Capriccio. Signifikantní rozdíly však nepřinesly ani měřené tóny z klarinetového

rejstříku. Barvu odlišnou od ostatních měl model Bohema pak především u tónu  $g_1$ , kdy v jeho spektru oproti ostatním výrazně vystupovala čtvrtá harmonická. Může se jednat o tón, který možná přespříliš vybočuje z řady ostatních, pro objektivnější závěr by bylo zapotřebí důkladnějšího průzkumu. Tato skutečnost však vyplynula také z průměrovaných spekter v tabulkové příloze RZ Bohema x Capriccio, kdy čtvrtá složka byla u modelu Bohema „osamocena“, zatímco u modelu Capriccio byla více podpořena sousedními lichými složkami, které barvě mohou vracet typický klarinetový nádech. Navíc se na základě této tabulky lze domnívat, že nástroje se spíše odlišují nikoli v klarinovém, ale šalmajovém rejstříku, kdy nástroj Capriccio měl častěji výraznější třetí, pátou, nebo také osmou harmonickou. V klarinovém rejstříku byla tato dvojice již více shodná s výjimkou čtvrté složky, která znovu u modelu Bohema mírněji převažovala, což může nástroji dodat o něco pronikavější ténbr, ne však tolik typický pro klarinet jako takový.

- **YCL CSG III** - U tohoto nástroje si dovolím říci méně obecnější závěr. V šalmajovém rejstříku se zdá, že odpovídá svému popisu v kap. 5.2, je tedy temnější či měkčí než ostatní měřené modely. S výše položeným tónem se pak jeho barevnost spíše zvětšuje a je naopak jedním z ostřejších. Z průměrovaných spekter prvního pásma harmonických se domnívám, že se z uvedených značek spíše podobá nástrojům výrobce RZ, hlavně v šalmajovém rejstříku, u vyšších tónů pak ale intenzita složek narůstá, což má pravděpodobně vliv na zmíněný vjem ostrosti.
- **BC Prestige a BC Festival** - Nástroje velice podobného charakteru, kdy spočtené veličiny s výjimkou několika vybočujících vzorků vykazovaly relativně shodu. Ze získaných dat předpokládám, že model Festival může mít tón o něco „světlejší“. Vykazoval nepatrně vyšší hodnoty uvažovaných veličin a s výjimkou tónu  $g_1$  měl sudé složky v prvním pásmu o něco intenzivnější. V LPC charakteristikách bylo v jeho případě možné také nalézt častěji formantové oblasti na vyšších kmitočtech. U nejvyššího měřeného tónu pak Festival působil o něco temněji, zůstává tedy otázkou, zda se tak celkově nechová i v dalším celém rejstříku. Celkově však tato dvojice v porovnání s ostatními dosahovala spíše vyšších hodnot uváděných veličin nezávisle na výšce tónu. Jejich předností tedy může být větší barvitost a zejména vyváženost tónů v měřených rejstřících.

Tab. 6.7: Příklad tabulky průměrovaných spekter tónu d.

Nástroj	BC Prodigé	RZ Bohema	YCL CSG III	RZ Capriccio	BC Prestige	BC Festival
Hladina akustického tlaku, spektrální centroid, spektrální roll-off, jasnost, ostrost tónu a tonalita						
$f_1$	0					
$f_2$	-33,18	-34,10	-36,38	-35,57	-35,70	-31,77
$f_3$	-3,39	-2,95	-2,17	-2,91	-1,68	-2,84
$f_4$	-20,29	-22,12	-20,81	-22,13	-20,14	-20,23
$f_5$	-5,92	-3,18	-4,48	-3,01	-4,20	-4,18
$f_6$	-18,14	-14,99	-15,86	-15,90	-15,05	-15,15
$f_7$	-14,14	-10,60	-11,96	-11,73	-13,25	-12,96
$f_8$	-17,51	-22,59	-17,07	-17,08	-14,55	-14,42
$f_9$	-20,34	-15,56	-17,82	-17,43	-18,44	-18,11
Hladina akustického tlaku, spektrální centroid, spektrální roll-off, jasnost, ostrost tónu a tonalita						
$L_p$ [dBSPL]	77,00	77,61	77,15	77,20	77,53	77,26
$SpC$ [Hz]	1393,34	1244,03	1227,38	1325,79	1355,94	1292,29
$SpRO$ [Hz]	4832,67	3733,33	3703,33	4150,00	4592,00	3789,33
$Jasnost$ [-]	4,97	4,64	4,66	4,75	4,88	4,94
$Ostrost$ [Acum]	0,63	0,67	0,64	0,64	0,66	0,65
$Tonalita$ [%]	78,90	82,44	83,30	81,85	80,54	82,67

Nakonec bych chtěl dodat, že i vzhledem k uvedeným poznatkům není barva nástroje zcela zásadním ukazatelem cenové dostupnosti. Ačkoli model BC Prodigé co se týče charakteru nijak nevybočuje, jsou dalšími důležitými faktory i zmíněný dynamický rozsah, kvalitativní vyhotovení těla či mechaniky nástroje a celková odezva na techniku hry. Je také evidentní, že převažující část barvy určuje především hráč, jak lze nejlépe vypořádat např. u dvojice RZ Bohema a RZ Capriccio v podání obou měřených hudebníků. Pro další výzkumy z oblasti dechových nástrojů tedy doporučuji použití umělých úst, nebo záznam velkého množství shodně hraných vzorků, na jejichž základě by bylo možné závěry podložit více daty. Je možné, že by se v takovém případě více projevíly i charakteristické rysy ve směrovosti, kterou momentálně nelze považovat za dostatečně vypovídající. Ačkoli je klarinet převážně všesměrový nástroj, ukázalo se, že případné změny vyzařovacích laloků jsou i přes stejný hmat často spjaté s odlišnou interpretací tónu.

## 7 Závěr

Bakalářská práce popisuje základy konstrukce klarinetu, princip tvorby tónu a vliv různých faktorů na výslednou barvu zvuku. Pro sjednocení slovních vyjádření a přiblížení psychoakustických aspektů při vyhodnocování barvy je uvedena odpovídající teoretická část, která zároveň popisuje získávání spektrálních charakteristik, nezbytných k analýze získaných dat.

Na základě teoretických poznatků jsem dále vypracoval několik skriptů ve výpočetním prostředí MATLAB, jehož prostřednictvím jsem do práce generoval příslušné komparační tabulky spekter, směrové a LPC charakteristiky. Vzhledem k velkému množství vzorků by zahrnutí každého souboru nebylo zcela přehledné, jejich značné množství je tedy uloženo v příloze a na jejich základě byly v textu z velké části odvozovány některé závěry.

Měření bylo provedeno pro šest různých nástrojů testovaných dvěma hráči, přičemž jsou v poslední kapitole diskutovány jak spektrální vývoj v závislosti na hrané dynamice, tak i odlišnost ve směrovosti jednotlivých harmonických složek nebo polohy formantových oblastí každého modelu. Výsledky jsou pak ve větší šíři shrnuty v podkapitole 6.8 i v souvislosti s rozdíly mezi oběma hráči.

Celkově bylo měření velkou měrou poznamenáno lidským faktorem a obecně lze tvrdit, že výslednou barvu tvořil spíše hráč než-li nástroj, resp. rozdíly mezi hráči byly mnohem výraznější, než mezi jednotlivými modely. Přesto se domnívám, že některé ze závěrů mohou být prospěšné především začínajícím hráčům při výběru nástroje, nebo také pokročilým hudebníkům při hlubším pochopení fyzikální podstaty tvorby tónu, resp. jak nátisk či výběr plátku může ovlivnit spektrální strukturu a tedy výsledný sluchový vjem.

Zajímavostí je pak zejména srovnatelná zvuková paleta nejlevnějšího modelu BC Prodigé s ostatními profesionálními modely, která je pravděpodobně kompenzována nižším dynamickým rozsahem a vzhledem k ceně také některými levnějšími komponenty. U dalších nástrojů bylo možné vyvodit spíše více obecnější závěry, některé z nich se dokonce přímo shodovaly s popisem distributorů nebo subjektivními názory klarinetistů v diskuzních fórech, pro vyvození objektivnějších poznatků však doporučuji zopakovat měření s umělými ústy, aby byly zajištěny stejné vstupní podmínky pro každý měřený model. V takovém případě by bylo vhodné vztáhnout směrové charakteristiky i k hodnotám některých psychoakustických veličin, z čehož by plynuly například informace o ostrosti v různých směrech. Obecně je však možné, že rozdíly v barvě jsou opravdu minimální a popularitu konkrétních modelů může spíše určovat celková odezva na herní techniku a s tím spojené psychické „pohodlí“ při interpretaci skladeb.

# Literatura

- [1] KOUKAL, Bohumír. *Historie a literatura klarinetu*. Brno: Janáčkova akademie múzických umění v Brně, 1991. ISBN 80-85429-01-2 (brož.).
- [2] ŘEZNÍČEK, Jan. *Vliv hubičky, plátku a ligatury na charakteristiku klarinetového tónu*. Čáslav, 2002. Diplomová práce. Konzervatoř v Pardubicích. Vedoucí práce Prof. Zdeněk Seidl.
- [3] *Clarina Music* [online]. Brno: Clarina Music, 2019 [cit. 2019-03-01]. Dostupné z: <https://www.clarina.cz>
- [4] Clarinet. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-03-04]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Clarinet>
- [5] GEIST, Bohumil. *Akustika: Jevy a souvislosti v hudební teorii a praxi*. Praha: Muzikus, 2005. ISBN 80-86253-31-7.
- [6] FROST, Eberhard. Die-klarinetten. *The-clarinets.net* [online]. Germany: Frost [cit. 2019-03-08]. Dostupné z: <http://www.the-clarinets.net>
- [7] SYROVÝ, Václav. *Hudební akustika*. 2. dopl. vyd. Praha: Akademie múzických umění, 2008. ISBN 978-80-7331-127-8 (váz.).
- [8] TYC, Tomáš. Akustika a hudební nástroje. *Zajímavá fyzika* [online]. Brno: Masarykova Univerzita [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: <http://zajfyz.physics.muni.cz/>.
- [9] Clarinet acoustics. *Music Science at UNSW* [online]. Australia: The University of New South Wales, 2019 [cit. 2019-03-15]. Dostupné z: <https://newt.phys.unsw.edu.au/jw/clarinetacoustics.html>
- [10] ZLATINTSI, Athanasia. *When The Clarinet Sounds Bad*. Stockholm, Švédsko, 2007. Diplomová práce. School of Media Technology. Vedoucí práce Kjetil Falkenberg Hansen.
- [11] MELKA, Alois. *Základy experimentální psychoakustiky*. Praha: Akademie múzických umění, 2005. ISBN 80-7331-043-0.
- [12] ŠTĚPÁNEK, Jan a Ondřej MORAVEC. *Barva hudebního zvuku a její slovní popis*. Praha: Akademie múzických umění, 2005. ISBN 80-7331-031-7.

- [13] KAY, Kevin. *Harmonic Analysis of the Soprano Clarinet*. Williamsburg, Virginia, 2017. Bakalářská práce. College of William and Mary. Vedoucí práce Prof. Keith Griffioen.
- [14] DAVIES, Bill. *Psychoacoustics* [online]. Salford, Velká Británie: University of Salford, 2019 [cit. 2019-04-02]. Dostupné z: <https://www.salford.ac.uk/research/sirc/research-groups/acoustics/psychoacoustics>
- [15] MIŠUREC, Jiří a Zdeněk SMÉKAL. *Číslíkové zpracování signálů*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2011
- [16] *Číslíkové zpracování signálů* [online]. Bratislava: Fakulta elektrotechniky a informatiky STU v Bratislavě, 2014 [cit. 2019-03-17]. Dostupné z: <https://www.ktl.elf.stuba.sk/study/css/>
- [17] ALEXANDRE-CORTIZO, Enrique, Manuel ROSE-ZURERA a Francisco LOPEZ-FERRERAS. *Application of Fisher Linear Discriminant Analysis to Speech/Music Classification* [online]. [cit. 2019-03-20]. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1630291>
- [18] S. DIXON. *Onset detection revisited, Proceedings of the 9th International Conference on Digital Audio Effects* [online]. [cit. 2019-03-21]. DAFX, 2006. Dostupné z: [http://www.dafx.ca/proceedings/papers/p\\_133](http://www.dafx.ca/proceedings/papers/p_133)
- [19] BALÍK, M. *Číslíkové zpracování akustických signálů 2*. Brno: FEKT VUT v Brně, 2014
- [20] WALACH, Jan. *Aplikace Fourierovy analýzy na rozpoznávání kvality samohlásek podle jejich formantů*. Olomouc, 2013. Bakalářská práce. Univerzita Palackého v Olomouci. Vedoucí práce RNDr. Tomáš Fürst, Ph.D.
- [21] HOLZ, Kristin. *The Acoustics of the Clarinet: An Observation of Harmonics, Frequencies, Phases, Complex Specific Acoustic Impedance, and Resonance* [online]. [cit. 2019-03-28]. Dostupné z: [https://courses.physics.illinois.edu/phys406/sp2017/NSF\\_REU\\_Reports/2013\\_REU/Kristin\\_Holz\\_Final\\_REU\\_Paper.pdf](https://courses.physics.illinois.edu/phys406/sp2017/NSF_REU_Reports/2013_REU/Kristin_Holz_Final_REU_Paper.pdf)
- [22] BENEK, Jan. *Posuzování elektromagnetického hluku pohonu psychoakustickými veličinami*. Plzeň, 2017. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Ing. Martin Janda, Ph.D.
- [23] JANOUSEK, Ivo. *ABC akustiky pro hudební praxi*. Praha: Supraphon, 1979.

## Seznam symbolů, veličin a zkratk

<b>ABS</b>	Akrylonitrilbutadienstyren; průmyslový kopolymer odolný vůči mechanickému poškození a teplotním výkyvům
<b>DFT</b>	Diskrétní Fourierova transformace, Discrete Fourier Transform
<b>FFT</b>	Rychlá Fourierova transformace, Fast Fourier Transform
<b>STFT</b>	Krátkodobá Fourierova transformace, Short-Time Fourier Transform
<b>LPC</b>	Lineární prediktivní kódování, Linear Predictive Coding
<b>DAW</b>	Digital Audio Workstation; prostředí k editaci, mixáži a masteringu zvukových stop
<i>SpC</i>	Spektrální centroid
<i>SpRO</i>	Spektrální roll-off
$f_{vz}$	Vzorkovací kmitočet
$f_m$	Mezní kmitočet

# Seznam příloh

A Obsah přiloženého CD

76



# A Obsah přiloženého CD

V přiloženém CD se nacházejí vypracované skripty k použití v programu MATLAB. Kód byl psán ve verzi 2014b.

Součástí CD jsou také komparační tabulky spekter v dalších dynamikách, které nebyly do práce vloženy, bylo na ně však v rámci slovního popisu odkazováno. Stejně tak jsou přiloženy další grafy LPC analýzy a směrových charakteristik. Nakonec jsou součástí také některé vzorky pro možnost testování správné funkčnosti.

```
/ ..... kořenový adresář přiloženého CD
├── MATLAB skripty ..... zdrojové kódy výpočtů
│   ├── FFTpomocny.m
│   ├── FFTtab.m
│   ├── Inharmonicita.m
│   ├── LPC.m
│   ├── OstrostSpust.m
│   ├── SmerovostHarm.m
│   ├── SpCSpR0.m
│   ├── STFT.m
│   ├── TabVypis.m
│   ├── Tonalita.m
│   └── PrevzateSkripty
├── Komparační tabulky spekter.. Tabulky spekter tónů všech dynamických úrovní
├── Formanty ..... Grafy LPC analýzy pro oba hráče
├── Směrové charakteristiky ..... Grafy směrových charakteristik pro oba hráče
└── Výběr ze vzorků ..... Vybrané vzorky k testování funkčnosti
```